This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06640463 7

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

D'ÉLECTRICITÉ PRATIQUE

PAR

R. BOULVIN
Ingénieur honoraire des Mines,
Ancien élève de l'Ecole supérieure de Télégraphie de Paris,
Ingénieur des Télégraphes,
Professeur d'électrotechnique à l'Ecole Industrielle de Bruxelles.

C. F. CHANDLER

BRUXELLES
A. MANCEAUX, ÉDITEUR
Rue des Trois-Têtes, 12 (Montagne de la Cour).

1890

6289

QC 523
.B7

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
311257B
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS
R 1945 L

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE D'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE I

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX

1. **Électricité.** — Si nous frottons un bâton de verre, d'ambre, de résine, de soufre, etc., avec un morceau de drap ou avec une peau de chat, les corps ainsi frottés acquièrent la propriété d'attirer des objets légers, tels que des petits morceaux de papier, plumes, etc., qui se trouvent à leur portée. On dit, que les corps auxquels on a communiqué la propriété que nous venons d'indiquer sont *électrisés* ou *chargés d'électricité*.

Nous ignorons absolument quelle est la nature même de l'électricité, mais nous pouvons parfaitement analyser et étudier ses effets.

2. **Corps bons conducteurs et mauvais conducteurs.** — Si nous prenons directement dans la main un corps métallique, tel qu'un cylindre de laiton, nous aurons beau le frotter avec du drap ou avec une peau de chat, il ne manifestera aucune trace d'électrisation ; mais si nous employons un bâton de verre, comme intermédiaire pour tenir le tube métallique, nous pourrons reproduire avec celui-ci les mêmes expériences qu'avec le bâton de cire à cacheter.

Les différentes matières peuvent être classées en deux

45 X 159

catégories, en se basant sur la façon dont elle se comportent au point de vue de l'électrisation.

La première comprend les corps qui gardent leur électrisation, ce sont les corps *mauvais conducteurs*. Pour les seconds, l'électricité disparaît au fur et à mesure qu'elle est produite par le frottement, à moins que l'on emploie comme intermédiaire pour les supporter, l'un des corps de la première catégorie, qui empêche la disparition de l'électricité; ce sont les *bons conducteurs*.

Si l'on électrise un corps bon conducteur en un endroit déterminé, tous ses points présentent immédiatement les mêmes phénomènes que les corps électrisés; il n'en est pas de même pour les mauvais conducteurs, là les phénomènes électriques restent confinés à l'endroit même où on les a déterminés. Sur les corps bons conducteurs, l'électricité se transmet d'un point à un autre avec la plus grande facilité, tandis que les corps mauvais conducteurs s'opposent à sa propagation.

Parmi les mauvais conducteurs, nous pouvons citer : l'air, et d'une façon générale les gaz et les vapeurs (si l'air n'était pas mauvais conducteur, on n'aurait pas pu découvrir les phénomènes électriques), le verre, le soufre, les résines, la gutta-percha, le caoutchouc, le bois très sec.

Au contraire, tous les métaux, l'eau, l'acide sulfurique, etc., sont de bons conducteurs. Le corps humain, la terre sont bons conducteurs; c'est ce qui explique pourquoi dès qu'on tient à la main un corps métallique, il cesse de s'électriser. L'électricité produite se répartit sur le corps soumis à l'expérience et sur toute la surface de la terre, c'est pourquoi un corps électrisé mis en communication avec le sol, l'effet produit se répartissant sur une surface énorme toute trace d'électrisation sensible disparaît, on

dit que l'*électricité s'est écoulée dans le sol et pour cette raison, les anciens physiciens avaient donné à la terre le nom de réservoir commun.*

3. **Isolants.** — Il résulte de là que si l'on veut produire des manifestations électriques sur un corps bon conducteur, il faut le supporter par l'intermédiaire d'un *mauvais conducteur* ou *isolant*. Les matières le plus généralement employées dans ce but, sont le verre, l'ébonite, la porcelaine, le papier, la paraffine, le bois sec suivant les circonstances. Le meilleur isolant connu, est l'air sec. Il faut que la matière mauvaise conductrice ne soit pas hygrométrique, sinon dans l'air chargé de vapeur d'eau, elle se recouvre d'une couche d'humidité; sous ce rapport l'ébonite doit être préféré. Cependant on emploie souvent le verre qui coûte beaucoup moins cher, mais il faut préférer celui dont la composition ne comprend pas trop d'alcali, et par surcroît de précaution, le recouvrir d'une couche de vernis à la gomme laque.

Avant de procéder aux expériences, il faut avoir soin d'essuyer tous les supports avec un linge sec légèrement chauffé.

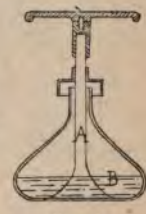


Fig. 1.

M. Mascart, professeur au Collège de France, a combiné un support isolant (fig. 1), disposé de façon que le pied soit toujours entouré d'air parfaitement sec. La tige verticale A, en verre, est soudée au fond d'un flacon B, de même matière, dans lequel on met de l'acide sulfurique qui absorbe l'humidité de l'air; un chapeau en laiton glisse à frottement le long de la tige A, de façon à fermer complètement B, quand on ne fait pas usage de l'appareil.

4. **Électrisation par conduction.** — Nous avons vu tout à l'heure, que l'électricité produite en un point quelconque d'un bon conducteur, se répand sur toute sa surface. Si un corps métallique, chargé d'électricité est mis en contact avec un autre corps bon conducteur, la charge d'électricité se partage entre les deux; si, au contraire, on l'amène en contact avec un mauvais conducteur, ce dernier ne s'électrise qu'aux seuls points où le contact s'est produit. L'électricité s'est portée *par conduction* du corps chargé sur ceux qui ne l'étaient pas, qui se trouvaient à l'*état neutre*.

5. **Phénomènes d'attraction et de répulsion.** — Prenons un *pendule électrique* (fig. 2), appareil qui est constitué par un support isolant auquel on suspend par l'intermédiaire d'un fil de soie, une balle en moelle de sureau, de façon que la petite balle qui est bonne conductrice, soit bien isolée.

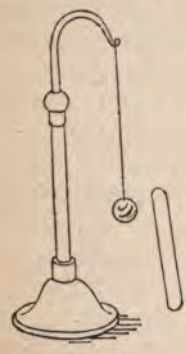


Fig. 2.

Si nous approchons un morceau de verre électrisé en le frottant avec du drap, par exemple, la balle sera vivement attirée, viendra en contact avec le verre, lui prendra par conduction une certaine quantité d'électricité, puis elle sera repoussée par le verre. Approchons ensuite du pendule un bâton de résine électrisé par frottement avec du drap, la résine attirera la balle.

Donc, celle-ci électrisée par contact avec le verre est *repoussée par le verre* et *attirée par la résine*. Nous pouvons conclure de là, que l'électricité du verre et celle de la résine ne jouissent pas de propriétés identiques. Il y

a donc deux espèces d'électricités, que l'on appelait autrefois l'électricité *vitrée* et l'électricité *résineuse*, et il n'y en a que deux espèces, car tous les corps connus se comportent vis-à-vis du pendule électrique, ou bien comme le verre ou bien comme la résine.

6. **Hypothèse sur la nature de l'électricité.** — Nous n'examinerons pas les diverses hypothèses qui ont été imaginées sur la nature de l'électricité. On suppose que l'électricité est un fluide extrêmement subtil qui se trouve partout dans la nature, lorsque, par exemple, l'on frotte un morceau de verre avec du drap, porté par un corps isolant, ce fluide se décompose en deux autres, l'un qui se porte sur le verre, c'est l'électricité vitrée ou positive, l'autre se porte sur le drap, c'est l'électricité résineuse ou négative. Le verre repoussera le pendule chargé d'électricité vitrée, tandis que celui-ci sera attiré par le drap. Tant que les deux fluides restent combinés, leur action sur les objets extérieurs est nulle, on dit que les corps sont à l'état neutre.

L'expérience peut encore se faire de la façon suivante: prenons deux plateaux A et B (fig. 3) l'un en métal porté par un manche isolant, l'autre en verre, et frottons les l'un contre l'autre, nous produirons ainsi la décomposition du fluide neutre dont ils sont chargés. Tant qu'ils restent en contact, il n'agissent pas sur le pendule, leurs actions réciproques s'annulent, mais si nous les séparons, l'un emportera de l'électricité vitrée,

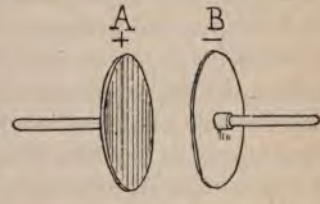


Fig. 3.

et l'autre l'électricité résineuse, ainsi que nous pouvons nous en assurer en les approchant successivement du pendule électrique.

Si nous prenons deux corps métalliques de mêmes dimensions, chargés l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative et, si nous les mettons en contact, les deux fluides se recombinent et les conducteurs reviennent à l'état neutre.

L'exactitude de cette hypothèse n'est pas démontrée, mais les choses se passent comme si l'électricité était en réalité le résultat de la combinaison de deux fluides, en tous cas ce moyen permet de donner une explication simple des phénomènes électriques.

7. — Des expériences exposées plus haut, nous pouvons déduire les lois suivantes :

On ne peut produire ou détruire une certaine quantité d'électricité sans créer ou faire disparaître quelque part une quantité équivalente d'électricité de nom contraire.

Deux corps chargés d'électricité de même nom se repoussent. — Deux corps chargés d'électricité de nom contraire s'attirent.

8. — Dans les expériences décrites plus haut, suivant que le drap a servi à frotter du verre ou de la résine, il est chargé, soit d'électricité négative, soit d'électricité positive. La façon dont le corps s'électrise n'est pas inhérente à la nature même de la matière, mais dépend des éléments en contact. Voici d'après Ganot, une liste de corps rangés de telle façon que si l'on considère l'un d'entre eux il s'électrise positivement ou négativement, suivant qu'on le frotte avec l'un de ceux qui le suivent ou qui le précèdent dans la liste.

1 Peau de chat.	9 Drap.
2 Verre.	10 Coton.
3 Ivoire.	11 Laque.
4 Soie.	12 Caoutchouc.
5 Cristal de roche.	13 Résine.
6 La main.	14 Gutta-percha.
7 Bois.	15 Métaux.
8 Soufre.	16 Coton poudre.

Ainsi le soufre, frotté avec une peau de chat s'électrise négativement, frotté avec du drap il se charge de fluide positif.

9. **Electricité produite par les actions chimiques.** — Le frottement n'est pas le seul moyen de produire l'électricité. Si nous prenons un vase, en matière isolante (fig. 4), contenant de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique, par exemple, et si dans ce vase nous plongeons deux lames métalliques, l'une en platine, en argent ou en cuivre, non attaquée par le liquide, l'autre en zinc, attaquée, l'action chimique déterminera la décomposition du fluide neutre, le métal non attaqué se chargera positivement, l'autre négativement.

Fig. 4.

10. **Electricité produite par la chaleur et les actions mécaniques.** — La chaleur et les actions mécaniques peuvent aussi donner lieu dans certaines conditions, que nous étudierons plus loin, à la production d'électricité. Certains minéraux étant chauffés acquièrent une charge électrique.

11. — Il n'y a aucune différence entre l'électricité produite par ces divers moyens ; l'électricité développée par le frottement, la chaleur ou les actions chimiques

peut donner lieu à des phénomènes absolument identiques, ainsi que nous avons l'occasion de le voir plus loin.

12. **Loi de Coulomb.** — Nous avons vu plus haut que deux corps s'attirent ou se repoussent suivant qu'ils sont chargés d'électricités de nom contraire ou de même nom. Si nous suspendons deux balles de moelle de sureau a et b, à un support isolant, nous constaterons que pour une charge déterminée d'électricité, elles se repoussent à une certaine distance, si l'on augmente la charge, la répulsion augmentera. Nous voyons par là qu'il y a une relation entre la grandeur de la répulsion et l'état électrique des deux corps conducteurs.

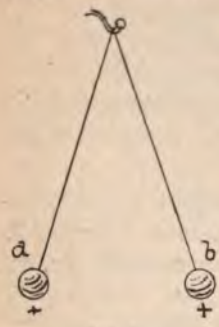


Fig. 5.

Coulomb en déterminant expérimentalement la grandeur de la force d'attraction ou de répulsion qui s'exerce entre deux corps chargés d'électricité est arrivé à cette loi :

Deux petites sphères électrisées s'attirent ou se repoussent avec une force, dont l'intensité est proportionnelle à la quantité d'électricité dont elles sont chargées, et en raison inverse du carré de leur distance.

C'est-à-dire que, si nous mettons en présence deux sphères a et b, chargées l'une d'électricité positive et l'autre d'électricité négative, elles s'attireront avec une certaine force, si nous communiquons à a, une charge double de celle qu'elle possède, la force d'attraction sera doublée. Si nous doublons la distance qui sépare a et b, la force d'attraction sera réduite au quart de ce qu'elle était d'abord.

13. **Quantité d'électricité.** — En nous basant sur la loi de Coulomb, nous avons un moyen de nous rendre compte de la quantité d'électricité dont un corps est chargé, il suffit pour cela de mesurer la grandeur de l'attraction ou de la répulsion qu'il exerce sur un pendule chargé d'électricité connue positive, par exemple. Si pour un même écartement un corps A exerce sur le pendule une attraction double de celle exercée par un corps B, c'est que A et B sont électrisés négativement, et que A est chargé d'une quantité d'électricité deux fois plus grande que B.

Partant de là, nous pouvons dire que deux corps électrisés étant placés à l'unité de distance et exerçant l'un sur l'autre, une attraction ou une répulsion est égale à l'unité de force, *chacun de ces corps est chargé d'une quantité d'électricité que nous pouvons prendre comme unité de quantité.*

CHAPITRE II

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

14. **L'électricité, à l'état de repos, se porte exclusivement à la surface extérieure des conducteurs.** — Un conducteur étant isolé, l'électricité s'y distribue de façon qu'il y ait équilibre entre toutes les forces, dans ces conditions l'électricité est totalement confinée à la surface extérieure du corps considéré. Nous allons démontrer ce fait, par une série d'expériences.

Expérience des deux hémisphères. Prenons une sphère métallique A (fig. 6), suspendue par un fil isolant, nous

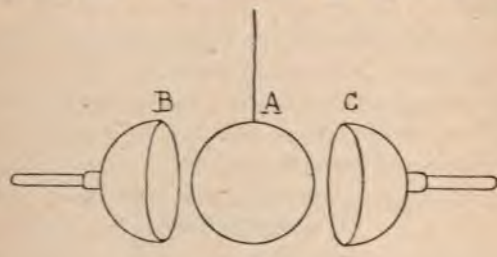


Fig. 6.

pouvons appliquer sur A, les deux hémisphères B et C portées par des manches isolants. A étant chargé d'électricité, si nous appliquons B et C, la surface extérieure de la sphère A, nous avons substitué celle de B et C, et si nous enlevons les deux hémisphères, ceux-ci emporteront toute la charge d'électricité.

Expérience de la sphère creuse. — Chargeons d'électricité une sphère métallique creuse A (fig. 7), portée par un pied isolant, nous allons rechercher la façon dont l'électricité est distribuée, au moyen d'un petit appareil nommé *plan d'épreuve*.

Fig. 7.

Ce plan d'épreuve est constitué par un petit disque mince en laiton, porté par un manche isolant D. Si nous touchons un corps électrisé en un point quelconque au moyen d'un appareil, le disque C emporte une petite partie de la charge du conducteur.

En touchant la sphère A, en différents points, au moyen du plan d'épreuve, nous pouvons constater (13) qu'en tous les points extérieurs nous trouvons de l'électricité, tandis qu'aucune trace d'électrisation ne peut être décelée lorsque l'on touche le conducteur à l'intérieur.

Expérience du filet de Faraday. — La fig. 8 montre la disposition employée, A est un filet en gaze conductrice, porté par un pied isolant B; CC est un fil de soie. A étant chargé d'électricité, nous pouvons, comme dans l'expérience précédente, constater que toute la charge se trouve à la surface extérieure. Si, au moyen du fil C, nous retournons le filet de façon que la surface extérieure passe à l'intérieur et vice-versa, nous constatons que la charge d'électricité a passé totalement sur la face externe, elle n'est donc pas adhérente au conducteur qui la porte.

15. **Chambre de Faraday.** — Il résulte de là un fait très important, notamment au point de vue de l'étude des

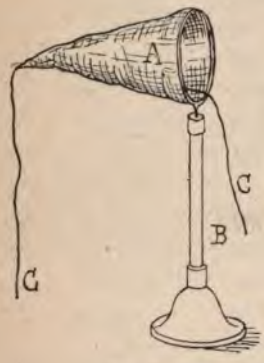


Fig. 8.

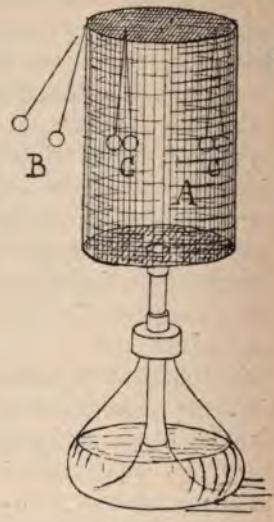


Fig. 9.

paratonnerres, savoir : *Un observateur se trouvant à l'intérieur d'une chambre conductrice isolée dont les parois sont fortement chargées d'électricité, ne pourra déceler aucune trace d'électrisation à l'intérieur de celle-ci.*

Il n'est pas même nécessaire pour cela que les parois de la chambre soient continues, elles peuvent être formées par une toile métallique comme une cage d'oiseau par exemple.

A étant une cage métallique portée par un pied isolant, si nous plaçons à l'intérieur et à l'extérieur des pendules B et C en moelle de sureau, suspendus par des fils con-

ducteurs, ces pendules s'électrisant en même temps que la cage.

Les boules B divergeront fortement, tandis que celles placées à l'intérieur ne manifesteront aucun signe d'électrisation.

16. **Nous pouvons conclure de ces expériences, qu'un objet entouré de toute part d'un conducteur métallique fermé est complètement garanti de toute action électrique provenant de l'extérieur du conducteur.**

17. **Influence de la forme des corps sur la distribution de l'électricité.** — La distribution de l'électricité, c'est-à-dire la quantité d'électricité par unité de surface se trouvant en chaque point d'un conducteur, est intimement liée à la forme de ce conducteur.

Nous pouvons nous faire une idée très nette du mécanisme de la distribution de l'électricité, si nous nous représentons le fluide électrique comme étant composé de particules très mobiles, qui se repoussent réciproquement, ce qui nous explique comment il se fait que l'électricité se maintient uniquement à la surface des conducteurs. Nous devons en conclure également que la distribution doit dépendre de la forme du corps ; les particules doivent se déplacer jusqu'à ce qu'elles se trouvent toutes dans une position d'équilibre sous l'influence des forces qui les sollicitent. Pour un conducteur sphérique, la charge d'électricité peut être représentée par une couche d'épaisseur uniforme (A, fig. 10), lorsque le conducteur présente des angles saillants, la couche va en s'épaississant vers les points les plus aigus, pour un ellipsoïde, par exemple (fig. 10, B), la quantité d'électricité par unité de surface est beaucoup plus grande vers la pointe.

On peut vérifier l'exactitude de ces faits, par la méthode du plan d'épreuve, si nous appliquons en diffé-

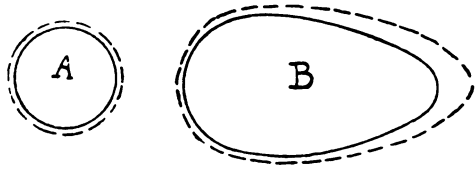


Fig. 10.

rents points des corps considérés un plan d'épreuve, ayant par exemple, 1 millimètre carré de surface, nous enlèverons la charge du corps étudié sur 1 millimètre carré de section, et nous pourrons la comparer à celle d'un petit pendule chargé d'électricité positive par exemple. Nous trouverons ainsi que la quantité d'électricité en chaque point, où si l'on peut dire l'épaisseur de la couche, peut être représentée comme il est indiqué à la fig. 10 par le trait interrompu.

Il résulte de là que l'électricité exerce une pression dirigée vers l'extérieur, contre la couche d'air qui environne le conducteur, et que cette pression devient d'autant plus grande, que l'épaisseur de la couche est elle-même plus considérable, ce qui se présente au fur et à mesure que le conducteur est plus aigu. Il arrive un moment où la pression devient tellement grande que l'air extérieur ne peut plus maintenir l'électricité sur le conducteur et celui-ci se décharge.

18. **Pouvoir des pointes.** — Ce que nous venons d'exposer explique pourquoi, un conducteur terminé par une pointe ne peut pas conserver une charge d'électricité.

On peut constater la déperdition de l'électricité par

[illegible]

Fig. 11.

[illegible] observe des aigrettes [illegible] de toutes les parties saillantes.

L'électricité en passant sur [illegible] façon que le corps conducteur [illegible] sion qui détermine un souffle [illegible] vent électrique. On peut [illegible] rent en présentant à la [illegible] fig. 11 ou bien au moyen [illegible] fig. 12.

19. — Tous les conducteurs [illegible] fortes charges d'électricité [illegible] de toutes parts des parties [illegible] avec le plus grand soin. Il est aussi difficile de conserver une forte charge sur un conducteur muni de pointes, que d'emmagasiner de l'air comprimé dans un réservoir, dont les parois présenteraient des parties trop faibles, pour résister à la pression intérieure.

CHAPITRE III

POTENTIEL. — FORCE ÉLECTRO-MOTRICE. — CAPACITÉ

20. — Lorsqu'un corps électrisé est mis en présence d'un corps neutre, et que par un procédé quelconque, on augmente successivement la charge du premier, il arrive comme dans le cas des conducteurs aigus, que la pression de l'électricité contre l'air devient assez grande pour que la charge s'écoule, malgré l'obstacle causé par l'isolant, et cela en donnant lieu à une étincelle. Le même phénomène se produit entre deux corps chargés d'électricités de noms contraires.

Si nous plaçons une sphère métallique A à l'état neutre portée sur un pied isolant, à une grande distance d'une source d'électricité, et si nous réunissons cette source au conducteur A par un long fil métallique fin, dès que nous aurons établi la communication, la sphère va se charger d'électricité et nous pourrons en tirer des étincelles.

Dans la première expérience que nous avons indiquée, l'électricité a dû se frayer un chemin à travers une forte épaisseur d'air, dans le second cas, elle s'est écoulée le long du fil. On dit que l'électricité *a franchi ces obstacles en vertu de la force électromotrice, de la différence de tension, de la différence de potentiel qui existait entre les deux corps considérés ou entre la source d'électricité et la sphère* A.

21. — On a donné le nom de **Force électromotrice** *à la*

cause qui fait que l'électricité se meut à travers les corps. Comme pour toutes les autres forces physiques, nous n'en connaissons pas la cause, l'essence même, si je puis m'exprimer ainsi, mais les effets nous en sont parfaitement connus, nous pouvons les observer et les mesurer. Ainsi, si nous disons (9) que l'action chimique qui se produit, lorsque l'on plonge une lame de zinc et une lame de platine, dans de l'eau acidulée, par l'acide sulfurique produit entre les deux plaques métalliques une force électromotrice de 1,5 et que, d'autre part, la force électromotrice qui existe entre le conducteur d'une machine électrique et un corps à l'état neutre est de 100,000, c'est que dans certaines conditions les effets produits seront 1,5 fois ou 100,000 fois plus grands que l'effet qui serait produit par la force électromotrice que nous avons prise comme point de comparaison, comme unité.

22. — Au lieu de force électromotrice, on emploie très souvent l'*expression différente de potentiel.* La notion du potentiel est essentiellement abstraite, elle n'a d'abord été employée que dans l'étude de la mécanique rationnelle; petit à petit, au fur et à mesure que les phénomènes électriques sont passés, du cabinet du savant, dans le domaine de l'industrie, le mot potentiel est passé dans le langage des électriciens, et l'on en fait aujourd'hui un usage courant. C'est pourquoi nous allons tâcher d'expliquer ce que l'on entend par potentiel ou différence de potentiel.

Nous devons pour cela reprendre les choses d'un peu haut, et procéder par comparaison.

Supposons que nous ayons un réservoir rempli d'eau placé à une certaine hauteur, 10 mètres, par exemple, et que du fond de ce réservoir descende un tuyau vertical, nous aurons à notre disposition une chute d'eau qui

pourra nous servir à faire marcher un moteur, une roue hydraulique, une turbine, par exemple. Nous savons d'après la mécanique que chaque kilogramme d'eau, tombant de 10 mètres de hauteur, est à même de produire, travail égal à 10 unités de travail nommées kilogramètres. Nous savons aussi, d'après la physique, que la pression exercée par la colonne d'eau dépend de la hauteur de la colonne et non pas de la plus ou moins grande étendue du réservoir; que le réservoir ait une surface de plusieurs hectares ou simplement quelques millimètres carrés, la pression hydrostatique restera la même. La pression au pied du tuyau est définie par la hauteur de cette colonne, c'est ce qu'on appelle la hauteur de charge, nous pouvons donc nous rendre compte de la pression en mesurant, au moyen d'un mètre, la hauteur de la colonne; *cette chute d'eau peut donc être définie par sa hauteur en mètres;* on dit que la *hauteur de charge*, en un point déterminé, est de 10 mètres, par exemple. Mais ce même élément peut être défini d'une autre façon. Nous avons rappelé tout à l'heure qu'un kilogramme d'eau, en descendant depuis le niveau supérieur du réservoir jusqu'au bas du tuyau, peut produire 10 unités de travail, 10 kilogrammètres. Il en résulte que nous pouvons définir notre hauteur de charge en disant que cette hauteur est telle, qu'une unité de poids, en descendant de cette hauteur, peut accomplir un travail égal à 10 unités de travail. Nous avons donc là un second moyen plus détourné d'évaluer la hauteur.

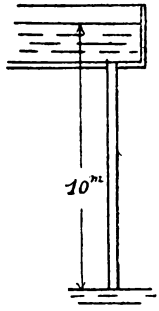


Fig. 13.

Ainsi, si nous voulions exprimer que deux hauteurs sont égales, nous pourrions le faire en disant qu'un poids de 1 kilogramme descendant de chacune de ces hauteurs produirait le même travail ; qu'une hauteur est double d'une autre en disant que le travail, qui peut faire l'unité de poids en descendant de la première hauteur, est double de celui qui pourrait être effectué en descendant de l'élévation la plus petite. C'est un moyen de représentation, il ne faut pas pour cela qu'il y ait réellement de l'eau ou un poids quelconque qui tombe.

Le potentiel en électricité est une notion analogue à la

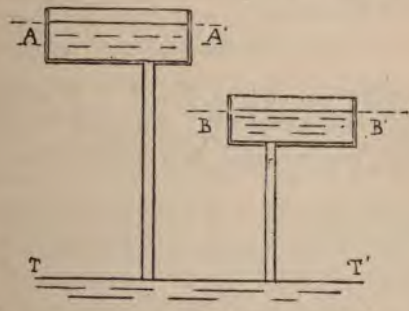


Fig. 14.

hauteur de charge telle que nous venons de la définir en mécanique.

Considérons deux réservoirs dont les niveaux AA', BB', sont à des hauteurs différentes, nous pouvons dire le potentiel en AA' est double de celui en BB', parce que le litre d'eau qui tomberait de AA', jusqu'au niveau du sol, fera un travail double de celui que ferait un litre d'eau tombant de BB' ou même TT'.

Si nous avions deux vases communiquants, contenant

de l'eau à des niveaux différents, le liquide se mettrait en mouvement, en vertu de la *différence de hauteur de charge*

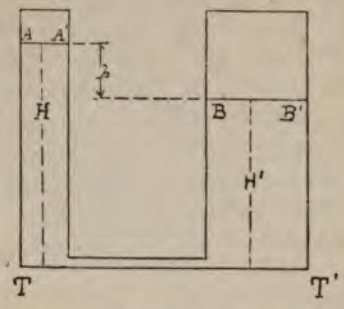


Fig. 15.

ou de la *différence de potentiel* H — H' = h, qui existe entre les niveaux AA' et BB' ; potentiels pris par rapport au plan TT', par exemple, pris comme plan de comparaison.

23. **Potentiel électrique.** — L'analogie avec ce qui existe en électricité est absolument complète. Dans l'expérience de l'électricité produite par le frottement de deux disques, l'un en verre, l'autre en métal (6, fig. 3), lorsque l'on sépare les deux disques l'un de l'autre, on éprouve une résistance provenant de l'attraction que l'électricité positive de l'un des plateaux exerce sur le fluide de nom contraire de l'autre. Lorsqu'on sépare ces deux quantités égales d'électricité, il faut dépenser *un certain travail* pour les transporter jusqu'à la distance où pratiquement elles n'auront plus aucune influence l'une sur l'autre. Si chacun des deux plateaux considérés était chargé de l'unité de quantité d'électricité (13), le travail qu'il a fallu dépenser pour les séparer comme il a été dit plus haut, repré-

senterait la différence d'état électrique, la *différence de potentiel* qui existe entre eux.

Plaçons maintenant les deux charges de nom contraire chacune d'une unité de quantité d'électricité vis-à-vis l'une de l'autre, de façon que l'attraction puisse s'exercer librement, qu'elles s'attirent et se recombinent. Par exemple, la charge positive était fixe, la charge négative étant portée par un conducteur léger qui est attiré, jusqu'au contact avec le premier, il est résulté de l'attraction des deux corps l'un sur l'autre, un certain travail effectué, si ce travail est égal à l'unité, c'est que la différence de potentiel entre les deux corps était égale à l'unité. Si le travail accompli est égal à 10 unités de travail, c'est que la différence de potentiel entre les deux corps était de 10 unités.

Considérons maintenant le cas d'un corps A chargé d'électricité, mis en communication avec la terre, nous nous trouvons dans le cas de la fig. 13. Le potentiel du corps A sera représenté par la quantité de travail que l'unité de charge pourra faire en passant du corps A dans le réservoir commun ; comme nous avons pu définir la hauteur de charge par la quantité de travail que fournit l'eau en passant de son niveau supérieur au niveau du réservoir commun, niveau du sol.

Quand nous mettons en communication deux conducteurs à des potentiels différents, une certaine quantité d'électricité passe, de celui qui a le potentiel le plus élevé, vers celui où il est le plus faible, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, comme dans le cas de la fig. 15.

24. — Lorsque l'on doit comparer des hauteurs de charge, des niveaux différents, on prend un niveau commun de comparaison, qui est généralement le niveau de

la mer, parce que l'on peut toujours le retrouver; lorsqu'il s'agit des températures, on choisit comme point de comparaison, comme point zéro, un niveau de convention qui est le point de fusion de la glace fondante. *En électricité, on choisit comme potentiel* 0, *celui de la terre, c'est-à-dire que l'on compare les potentiels des corps à celui de la terre;* comme on compare la hauteur de deux montagnes en prenant comme côte 0, le niveau de la mer.

25. — On admet que tous les corps dont le potentiel est supérieur à celui de la terre, sont chargés d'électricité positive, qu'au contraire, ceux dont le potentiel est inférieur à celui de la terre, sont chargés d'électricité négative. Il résulte de là que, si l'on réunit un conducteur électrisé à la terre, une partie de la charge s'écoulera vers le sol s'il est chargé positivement, et qu'au contraire, le réservoir commun lui cèdera une partie de sa charge s'il est chargé négativement.

26. — Lorsque l'on crée entre deux lames métalliques une différence de potentiel par une action chimique (9, fig. 4), l'une des lames se charge d'électricité positive, l'autre d'électricité négative; si on les réunit par un fil métallique extérieur, l'action chimique entretient la *différence de potentiel ou force électromotrice* qui existe entre les deux lames, le fluide positif passe de la lame dont le potentiel est le plus élevé vers l'autre métal chargé négativement, et tout se passe comme s'il y avait un courant de fluide allant du pôle positif au pôle négatif. C'est là, comme nous l'avons dit plus haut, une simple hypothèse, mais elle facilite considérablement l'exposé de tous les phénomènes électriques, et elle n'a jamais été trouvée en défaut.

27. **Capacité.** — Un conducteur étant donné, la quan-

tité d'électricité qu'il peut emmagasiner dépend de deux éléments : 1° du conducteur lui-même; 2° du potentiel auquel il est porté.

Un conducteur à un potentiel 2,3,4 possède une charge 2, 3, 4, etc. fois plus grande que quand il est au potentiel 1. On appelle *capacité* du conducteur la quantité d'électricité qu'il peut recevoir sous un potentiel égal à 1.

L'électricité dans ce cas se comporte comme un fluide compressible contenu dans un réservoir. La quantité de gaz que l'on peut enfermer dans le récipient dépend de la *capacité de celui-ci*, et de la pression à laquelle le gaz est comprimé.

La quantité d'électricité portée par un conducteur est égale à sa capacité, multipliée par le potentiel.

Quantité = capacité × potentiel.

Cette relation, connaissant deux des éléments, permet de déterminer le troisième.

CHAPITRE IV

ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE. — INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE. — CONDENSATION

28. **Électrisation par influence.** — Si d'un conducteur électrisé A (fig. 16), nous approchons un conducteur B à l'état neutre, ce dernier devient le siège de phénomènes

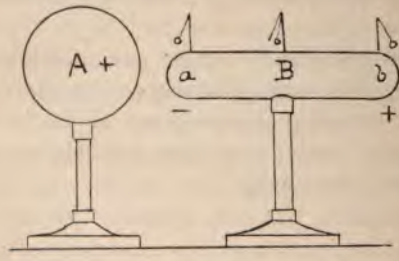


Fig. 16.

électriques. C'est ce que l'on appelle l'*électrisation par influence* ou l'*induction électrostatique*.

Supposons que le conducteur A est chargé d'électricité positive, si nous appliquons à B le procédé (10) que nous avons indiqué pour l'étude de la distribution de l'électricité sur un conducteur, nous constaterons à l'extrémité *a*, une charge négative, en *b*, une charge positive, et que le milieu est à l'état neutre.

Sous l'influence de A, l'électricité neutre de B a été décomposée, le fluide négatif est attiré vers l'extrémité *a*,

tandis que la charge positive est repoussée vers l'extrémité la plus éloignée. Dès que nous écartons B assez loin pour que l'influence de A ne se fasse plus sentir, les deux charges *a* et *b* se recombinent et toute trace d'électrisation disparaît. Recommençons l'expérience, et mettons un point quelconque de B en communication avec le sol, la charge négative est maintenant sur le conducteur par suite de l'attraction exercée sur elle par A, tandis que la charge positive B est repoussée dans le sol. B reste chargé d'une quantité d'électricité égale et de signe contraire à celle du conducteur influençant A. Si l'on écarte maintenant B, du conducteur influençant, il conservera sa charge négative qui se répartira sur toute sa surface. C'est sur ce principe que reposent les machines à induction dont il sera question plus loin.

29. — De ce qui précède, il résulte qu'une charge d'électricité ne se trouve jamais seule dans la nature, il y a toujours quelque part une charge égale et de signe contraire. Quand l'on fait des expériences dans une salle, les corps chargés induisent sur les murailles, sur les expérimentateurs, des quantités égales et de signe contraire d'électricité. Lorsque la distance est suffisante, l'influence de ces charges n'est pas sensible sur nos appareils.

30. **Moyen de soustraire un conducteur aux effets d'induction.— Ecran métallique.** — Soit un conducteur A électrisé positivement, par exemple, et un pendule en moelle de sureau B suspendu par un fil isolant. Entre A et B interposons un écran métallique C, de grandes dimensions relativement à A.

Lorsque l'écran est isolé, le pendule est violemment attiré, tandis qu'il reste immobile dès que C est mis en communication avec la terre.

Voici comment on peut expliquer cette différence d'action : Par induction dans le premier cas (fig. 17), le fluide

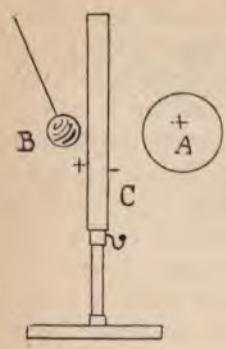


Fig. 17.

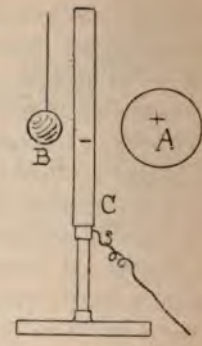


Fig. 18.

neutre de C est décomposé en deux charges + C et — C égales et de signe contraire; l'action de — C est neutralisée par celle de + A, et + C agit seule sur le pendule. Dans le deuxième cas, au contraire, + C s'écoule dans le sol, les deux charges + A et — C égales et de signe contraire se neutralisent et le pendule B reste immobile.

31. **Electroscope à feuilles d'or.** — Cet appareil sert à reconnaître quand les corps sont chargés d'électricité, ainsi que le genre de leur électrisation. (Fig. 19.)

Il consiste essentiellement en une tige métallique A, portant à son extrémité inférieure deux feuilles d'or très légères BB', et à sa partie supérieure une boule A.

Les feuilles d'or se trouvent à l'intérieur d'une cloche en verre reposant sur un plateau métallique qui peut être mis en communication avec le sol. C est un écran métallique relié au socle par deux bandes d'étain DD'. La tige

A B est supportée de façon à être parfaitement isolée de toutes les autres parties métalliques de l'appareil.

Si nous touchons A avec un corps électrisé, une partie de sa charge passe sur la tige et les feuilles d'or, qui étant ainsi chargées d'électricité de même nom, se repoussent; la répulsion est d'autant plus grande que le potentiel du corps est plus élevé.

Fig. 19.

Veut-on maintenant reconnaître la nature de l'électricité dont un corps est chargé, on approche de la boule mais sans la toucher le corps à examiner; par induction l'électricité de la tige AB est décomposée, pendant qu'elle est sous l'influence du corps à analyser, on met A en communication avec le sol, la charge de même nom que celle inconnue est repoussée vers la terre, et l'électroscope conserve une charge de nom contraire à celle du corps soumis à l'examen. On enlève le corps influençant, et on le remplace par une autre chargé d'électricité de nom connu, on prend, par exemple, du verre frotté avec du drap. Si la divergence des feuilles augmente, c'est que l'électricité de l'électromètre est repoussée dans les feuilles, par conséquent que celui-ci est chargé positivement, le corps à examiner est donc chargé de fluide négatif. Si, au contraire, la divergence diminue, c'est que la charge en question est positive.

32. **Condensation.** — Prenons un plateau conducteur A, porté par un support isolant et mis en communication

avec une source S d'électricité positive (fig. 20), par exemple, la source fournit de l'électricité au conducteur A jusqu'au moment où le potentiel de A sera égal à celui de la source. Si à ce moment nous isolons par la pensée une charge *a* égale à l'unité, le travail que pourrait faire cette charge, en passant à la terre, nous donnerait la valeur du potentiel du conducteur considéré. Si nous plaçons parallèlement à A, un plateau B isolé deux charges égales et du signe contraire + B et — B, + A étant égale à + B. L'unité de quantité *a*, en s'écoulant vers la terre, serait soumise à la répulsion de + A, et de + B et à l'attraction de — B ; or, les actions de + B et de — B s'équilibrent, par conséquent, la présence du conducteur B ne change pas le potentiel de A.

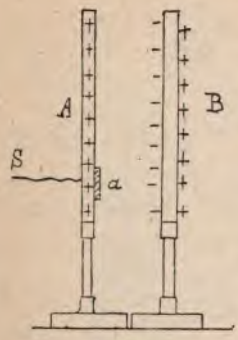


Fig. 20.

Mais il n'en sera plus de même si nous mettons B *en communication avec le sol*, B ne conservera plus que l'électricité négative, le fluide positif étant repoussé vers le réservoir commun. La force qui tend à repousser A vers le sol, est donc diminuée de l'attraction exercée par la charge — B, il en résulte que le travail qui pourrait être fourni, sera considérablement diminué, et par conséquent *un conducteur chargé d'électricité, étant donné, si l'on en approche un autre en communication avec la terre, la présence de ce second conducteur aura ponr effet de diminuer le potentiel du premier.*

Dans le cas qui nous occupe A étant en communica-

tion avec une source d'électricité et son potentiel ayant été diminué, il en résultera qu'une nouvelle quantité de fluide s'écoulera vers A, jusqu'à ce que les potentiels soient de nouveau devenus égaux. *Il en résulte, que la présence du conducteur* B *non isolé, aura eu pour effet d'augmenter la capacité de* A, *puisque pour un même potentiel il a emmagasiné une quantité plus grande d'électricité.*

Un appareil, constitué par deux conducteurs tels que A et B, séparés par une couche de matière isolante, porte le nom de *condensateur*. Parce que cet appareil permet d'emmagasiner, de condenser une grande quantité d'électricité.

33. **Capacité d'un condensateur.** — D'après l'explication que nous avons donnée, il est facile de comprendre que la quantité d'électricité que l'on pourra emmagasiner dans l'un de ces appareils, pour un potentiel déterminé de la source, c'est-à-dire la capacité du condensateur (26) sera d'autant plus grande que la distance entre les deux conducteurs sera plus petite.

La capacité d'un condensateur varie avec la nature de la matière isolante qui sépare les deux conducteurs ou *armatures*. Ainsi, si nous représentons par 1 la capacité d'un condensateur dont l'isolant ou *diélectrique* serait constitué par une couche d'air. Si l'on remplace l'air par une épaisseur égale de paraffine, la capacité sera 2, elle deviendra 3 avec du caoutchouc vulcanisé, 4.2 avec de la gutta-percha, 5 avec du mica, de 6 à 10 avec du verre, suivant sa composition.

On dit que la *capacité inductive spécifique* de la paraffine, de la gutta-percha, etc., est plus grande que celle de l'air.

La capacité inductive spécifique d'une substance est le

rapport entre la capacité d'un condensateur dont les armatures sont séparées par cette substance, et celle d'un condensateur de mêmes dimensions dont le diélectrique serait de l'air sec.

34. **Diverses formes de condensateurs. Condensateur plan ou condensateur d'Œpinus.** — Cet appareil (fig. 21) comprend deux armatures planes, A et B, portées par des supports

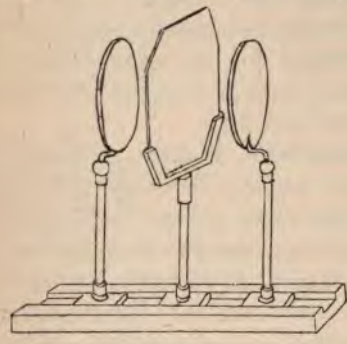


Fig. 21.

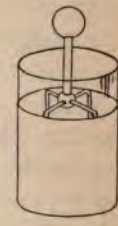


Fig. 22.

isolants, pouvant glisser le long d'une règle graduée, ils sont séparés par un plateau C, en ébonite, en verre, en gutta-percha, etc. C'est un appareil de démonstration, on ne peut pas lui donner des dimensions suffisamment grandes pour pouvoir emmagasiner de grandes charges.

Bouteille de Leyde. — C'est la forme de condensateur la plus anciennement connue (fig. 22). Elle se compose d'un bocal en verre, à l'intérieur duquel on colle une armature en étain. L'armature intérieure est formée par des feuilles d'or froissées qui remplissent le bocal, ou par une feuille d'étain, collée également, quand l'ouverture est suffisante. Une tige sert à mettre l'armature

intérieure en communication avec la source d'électricité.

On appelle *jarre* une bouteille de Leyde de très grande capacité.

35. **Accouplement de plusieurs condensateurs.** — 1° *Accouplement en surface ou en quantité.* — Si l'on réunit ensemble toutes les armatures intérieures (fig. 23), ainsi que toutes

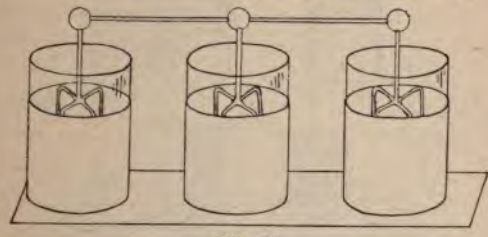


Fig. 23.

les armatures extérieures, il est aisé de comprendre que l'on obtient une capacité égale à la somme des capacités de tous les condensateurs employés. *La capacité est proportionnelle à la surface des armatures.*

La différence de potentiel entre les deux armatures reste la même. On obtient ainsi des batteries très puissantes qui peuvent condenser des charges considérables.

2° *Accouplement en tension.* — On réunit l'armature extérieure de la première jarre à l'armature intérieure de la seconde, et ainsi de suite (fig. 24) ; pour effectuer le chargement on met la dernière armature en communication avec le sol.

Soient deux condensateurs A.B, A'B'. Mettons A en communication avec la source, A prend une charge + A, qui induit deux charges — A sur B et + A sur A' ; cette dernière induit à son tour — A sur B' et + A qui découle à la terre. Lorsque l'on réunit les deux armatures A et

B′ par un conducteur, ou bien lorsqu'on les approche assez près l'une de l'autre, pour qu'il jaillisse une étin-

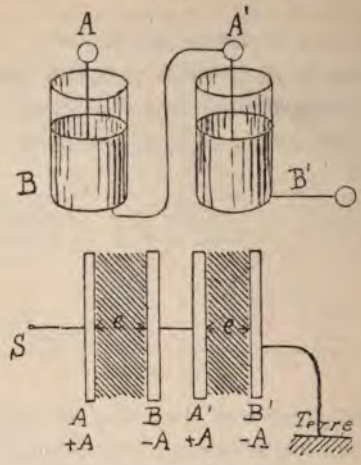
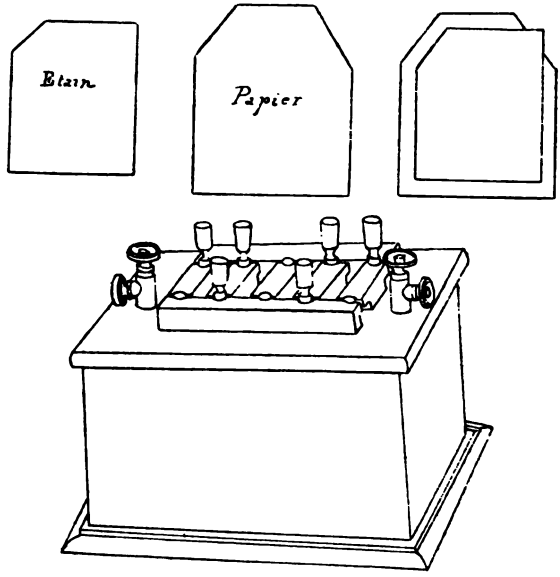


Fig. 24.

celle, nous avons à notre disposition les deux charges + A et — A de A et B′, celles de B et A′ se recombinent directement. De sorte que, en fin de compte, nous disposons de la même énergie que si nous avions affaire à un condensateur simple, ayant comme armatures A et B′ et une épaisseur de diélectrique, égale à 2 *e*. La capacité de ce condensateur sera donc moitié moindre de celle d'un condensateur unique, le seul avantage, *c'est que nous pourrons lui faire supporter une différence de potentiel double de celle qui briserait le diélectrique d'un condensateur simple.*

On ne doit donc employer les condensateurs en cascade, que dans le cas où l'on doit opérer avec des tensions extrêmement élevées.

36. **Condensateurs employés en télégraphie et en téléphonie.** — Dans ce cas, comme les tensions ne sont pas très élevées, on peut faire usage de diélectriques très minces, ce qui



Condensateur Gradué

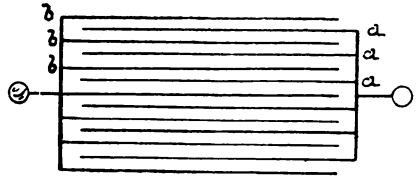


Fig. 25.

permet de donner à ces appareils une capacité considérable sous un faible volume.

Ces condensateurs sont formés de feuilles d'étain empilées et séparées par du papier paraffiné ou des feuilles de mica. Toutes les feuilles de rang impair sont soudées ensemble en un point, il en est de même des feuilles de rang pair (fig. 25). Le tout forme un bloc, noyé dans de la paraffine. Il faut avoir bien soin que celle-ci soit exempte d'eau.

La capacité inductive spécifique du mica étant à peu près double de celle de la paraffine, il en résulte que pour une même capacité les condensateurs au mica ont une surface beaucoup moindre que ceux dont la paraffine forme le diélectrique. Malgré cela on n'emploie le mica, que pour les appareils de mesure à cause de son prix élevé.

37. **Charge résiduelle, électrification.** — Lorsqu'un condensateur est mis pendant assez longtemps en communication avec la source d'électricité, les choses se passent comme si l'électricité pénétrait à l'intérieur du diélectrique ; *c'est ce que l'on appelle l'électrification;* en mettant les deux armatures en communication pendant un temps assez court, on peut obtenir successivement plusieurs décharges successives qui sont de plus en plus faibles, elles portent le *nom de décharges résiduelles*, parce que elles sont produites par le résidu de la décharge principale.

Ce phénomène est rendu très apparent en faisant usage d'une bouteille de Leyde démontable (fig. 26). On charge la bouteille, on la démonte et on met les armatures en communication avec le sol, elles sont ainsi privées de toute trace d'électricité. On remonte la bouteille, et on peut encore obtenir une décharge provenant de

l'électricité, qui était restée adhérente au bocal C, formant le diélectrique.

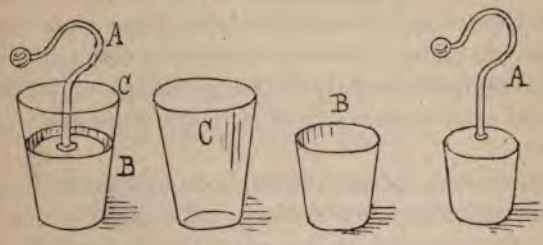


Fig. 26.

38. **Electromètre condensateur.** — Quand on veut rendre sensible des phénomènes électriques de très peu d'importance, pour montrer, par exemple, la différence de potentiel, qui existe entre les deux pôles, d'un seul élément, cuivre et zinc, dans l'eau acidulée (9. fig. 4). On fait usage de l'*Electromètre condensateur de Volta*. C'est un électroscope à feuilles d'or (30. fig. 19), dont la boule supérieure est remplacée par un plateau A, formant l'une des armatures d'un condensateur (fig. 27). L'autre armature est formée par le plateau B, muni d'un manche isolant C. Le diélectrique est formé par le vernis qui recouvre les parties métalliques; son épaisseur est ainsi réduite au minimum.

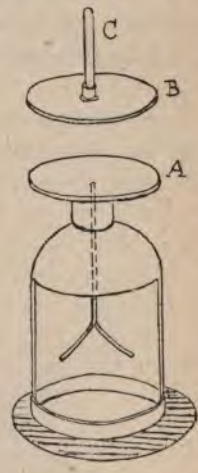


Fig. 27.

On touche l'un des plateaux avec le corps dont on étudie l'électrisation, l'autre armature du condensateur étant mise en communication avec le sol. Puis on enlève B, la charge de A devient libre et se répartit sur toute la surface du plateau, de la tige verticale et des feuilles d'or. On peut ainsi emmagasiner l'électricité, produite par des sources extrêmement faibles et rendre leurs effets apparents.

Pour le reste, on peut se servir de cet appareil comme de l'électroscope à feuille d'or.

CHAPITRE V

PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ A HAUTE TENSION

MACHINES ÉLECTRIQUES

39. Pour produire des effets électriques intenses, on a cherché à réaliser des combinaisons mécaniques, permettant de produire l'électricité d'une façon continue. On est arrivé ainsi à construire un grand nombre de *machines électriques* diverses, mais qui peuvent se diviser en deux grandes classes :

1° Les machines où *l'électricité est produite par le frottement;* 2° celles où l'on utilise *les phénomènes d'induction.* Nous ne passerons en revue que les types les plus caractéristiques.

40. **Machines à frottement. Electrophore de Volta.** — Il se compose d'un gâteau de résine A, coulé dans un moule en métal B; et d'un plateau métallique C, muni d'un manche isolant (fig. 28).

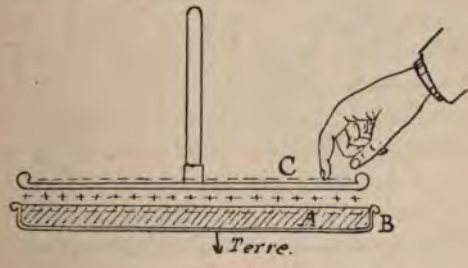


Fig. 28.

Voici la façon de se servir de cet appareil : On enlève d'abord C, et l'on électrise le gâteau de résine en le frottant avec une peau de chat; il se charge ainsi de fluide négatif. Ensuite, on place C sur A, l'électricité négative de A décompose le fluide neutre de C; si l'on met ce conducteur en communication avec le sol, pendant qu'il est sur A, la charge négative disparaît et le plateau C reste chargé d'électricité positive que l'on peut utiliser à charger une bouteille de Leyde ou à faire toute autre expérience.

La manœuvre de cet appareil est très longue et l'on ne peut ainsi produire que des quantités très faibles d'électricité.

41. **Machine de Ramsden.** — Elle se compose (fig. 29) d'un

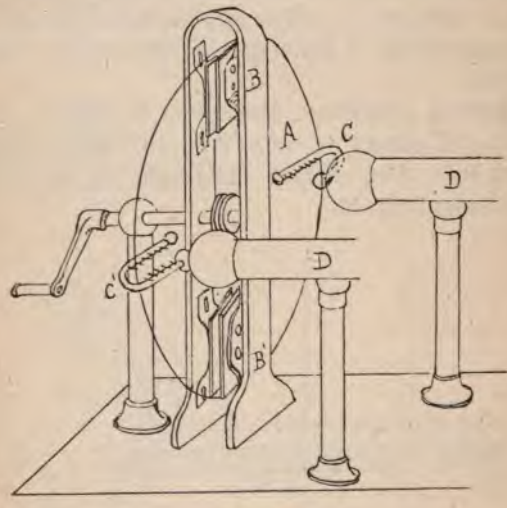


Fig. 29.

[illegible]

[illegible]

[illegible]

12 Machine à induction. [illegible] basées sur la multiplication d'une [illegible] obtenue par frottement, en utilisant les phénomènes

d'induction. C'est pourquoi on les appelle quelquefois des *multiplicateurs d'induction*.

Le dispositif ci-contre (1) (fig. 31), permet de se rendre compte du fonctionnement des machines, dont nous nous occupons. Il se compose de deux vases métalliques A et B et d'une tige conductrice C D, portés par des sup-

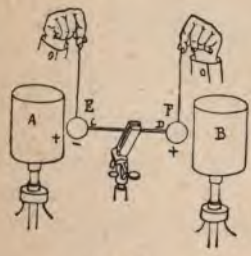


Fig. 31.

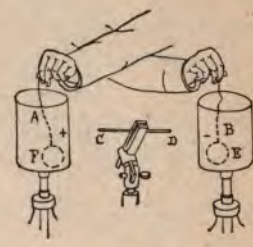


Fig. 32.

ports isolants. Deux petites boules conductrices E et F, sont suspendues par des fils de soie.

On commence par communiquer à A une légère charge positive, par exemple, par induction E se chargera négativement et F positivement.

Si à ce moment nous enlevons les deux boules et que nous introduisions F dans le bocal A et E dans B (fig. 32), la charge positive de F passera sur A et s'ajoutera à celle que ce conducteur possédait déjà, et B acquerra une petite quantité d'électricité négative. Recommençons l'opération, la charge de A étant augmentée et l'effet de l'induction de B venant s'ajouter à celui de A, E et F, acquerrant des charges plus grandes que dans la première opération, par conséquent il y aura une augmen-

(1) Ayrton. *Practical Electricity*.

tation de charge plus grande que lors de la première opération.

Si nous continuons la même manœuvre, un nombre suffisant de fois, nous pourrons arriver à augmenter, pour ainsi dire, indéfiniment les charges de A et B.

Fig. [illegible]

43. Machine de Belli (1). — La première machine rotative, reposant sur le principe que nous venons d'exposer, a été imaginée en 1831, par le professeur Belli, de Milan (fig. [illegible]). Les deux vases métalliques sont remplacés par deux conducteurs semi-cylindriques isolés A et B. Deux disques métalliques E et F sont portés par une tige en verre qui peut être mise en mouvement au moyen d'une manivelle. Les deux disques E et F, au moment où ils vont sortir des conducteurs, sont mis en communication métallique par un fil métallique C D.

Lorsque F entre à l'intérieur de A, et E de B, ils rencontrent deux ressorts de contact H et H', par lesquels la charge s'écoule sur les conducteurs.

44. Replenisher ou rechargeur de William Thomson. — Comme principe cette machine est identique à la précédente, la disposition des organes seule diffère. Elle a été imaginée par Willam Thomson, pour donner une charge constante à un conducteur dans certains appareils de mesure.

A et B sont les deux conducteurs formés chacun d'une

(1) *The influence machine*, from 1788 to 1888, par le professeur Silvanus Thompson, *Journal of the Society of Telegraph Engineers Electricians*, vol. XVII, n° 74, 31 mai 1888.

portion de cylindre en laiton, les deux pièces métalliques E et F, appelées porteurs, sont fixées à une tige en ébonite, qui peut tourner autour de l'axe, K. C D est le fil conducteur qui réunit les deux porteurs au moment où ils sont soumis à l'induction (fig. 34 et 35).

A reçoit, au préalable, une charge positive, dans la

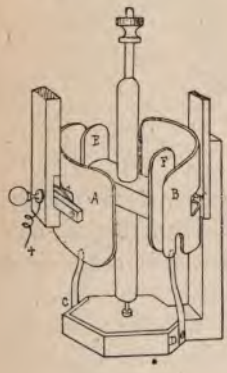


Fig. 34

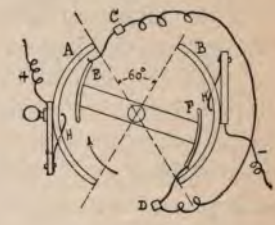


Fig. 35.

position indiquée par la figure, la charge de A agit comme il a été indiqué (42). Si la rotation se fait dans le sens de la flèche, E venant en contact avec H', communique l'électricité négative, tandis que F cède sa charge positive à A. Les pièces conductrices E et F s'appellent les transporteurs.

45. **Allumeur à gaz de Clarke** (fig. 36). — Cet appareil est très répandu pour l'allumage des becs de gaz dans les magasins. Le principe de son fonctionnement est identique à celui de replenisher de Thomson. Les deux conducteurs A et B sont formés par des feuilles d'étain,

collées à l'intérieur d'un cylindre en ébonite. Dans ce cylindre s'en trouve un second, également en ébonite,

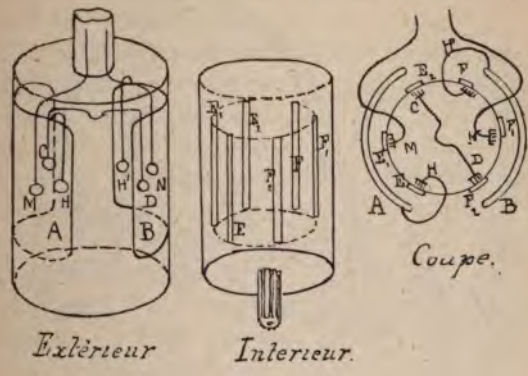


Fig. 36.

auquel on peut donner un mouvement rapide de rotation.

Sur le cylindre intérieur sont collées six lamelles d'étain E, E_1, E_2, F, F_1, F_2, qui jouent, deux à deux, le rôle des transporteurs, C D établit au moment voulu, la communication entre les transporteurs, et H, H' sont les ressorts de contact. L'électricité est conduite par M et N, vers l'extrémité d'une tige plus ou moins longue, à deux pointes isolées entre lesquelles éclate l'étincelle.

Le frottement des contacts C et D sur les lames d'étain E et F suffit pour donner la charge électrique initiale.

46. **Machine de Holtz.** — Parmi les machines électriques à induction, la plus répandue dans les laboratoires, est la machine de Holtz. Dans cet appareil, la production d'électricité est continue, au lieu d'être intermittente, comme dans les appareils que nous venons de décrire.

Les porteurs métalliques E, F, sont remplacés par un plateau en verre P (fig. 37); l'électricité induite se

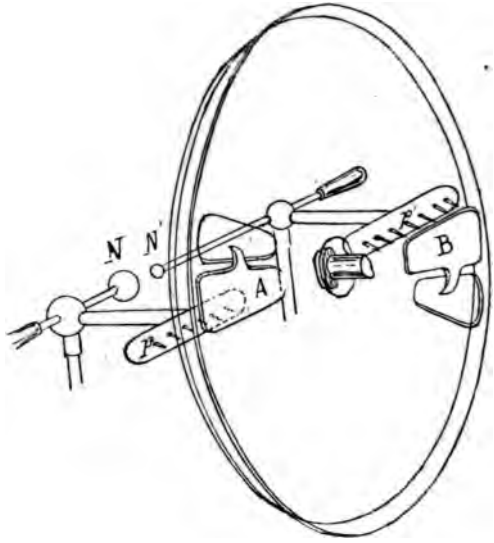


Fig. 37.

fixe à la surface du verre à cause de sa faible conductibilité. Ce plateau est monté sur un axe en ébonite M M (fig. 37*bis*), au moyen duquel on peut lui donner un mouvement rapide de rotation. Parallèlement à ce disque mobile s'en trouve un fixe Q, portant deux armatures en papier A B, collées à sa surface, en outre il est percé suivant un même diamètre de deux ouvertures O O'. Les deux armatures en papier portent deux languettes terminées en pointe se dirigeant vers la surface de P. En face se trouvent les peignes *pp'*, communi-

quant avec les pôles N N′ de la machine et avec les conducteurs.

Pour faire fonctionner la machine de Holtz, il faut d'abord amener en contact les deux pôles NN′, ensuite mettre le plateau en mouvement et communiquer une charge initiale à l'une des armatures A, soit en la touchant avec l'une des armatures d'une bouteille de Leyde, préalablement chargée au moyen d'une source quelconque, électrophore ou machine à frottement, ou bien plus simplement au moyen d'une plaque d'ébonite électrisée en la frottant avec une peau de chat. La machine est ainsi *amorcée* et si après quelques tours on écarte les électrodes N et N′ on voit une suite d'étincelles se précipiter de l'une à l'autre. Voici l'explication du fonctionnement : communiquons à l'une des armatures inductrices B, par exemple, une petite charge négative; il en résulte, par induction, une charge positive + E et une charge négative —E; par suite de l'action du peigne, la charge négative passe sur p′N′; le plateau dans son mouvement emporte la charge +E qui après un demi tour vient se présenter à la pointe H et par là passe sur A qui est ainsi électrisé positivement; cette charge A

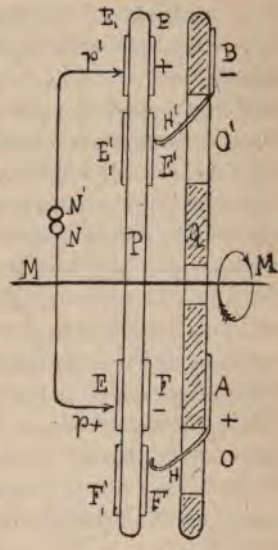


Fig. 37*bis*.

agit comme B, mais les effets sont inverses. Les deux armatures A et B étant chargées, la machine est amorcée et l'on peut écarter N et N'; la même série de phénomènes se reproduira, si l'on écarte les deux électrodes et qu'on les mette en communication avec des conducteurs isolés, l'un recueillera l'électricité positive, l'autre la négative.

Au lieu d'employer des conducteurs de grandes dimensions, comme dans les machines de Ramsden, on fait usage de bouteilles de Leyde, suspendues à chacune des électrodes par l'armature intérieure et dont les armatures extérieures communiquent entre elles. Sous un petit volume, on a ainsi des conducteurs de grande capacité.

47. — Il y a un grand nombre de modèles de machines à induction parmi lesquelles on peut citer les machines de Voss, de Toepler, de Wimshurst, qui toutes reposent sur un principe analogue.

Dans ces machines, on emploie des porteurs en métal collés sur le plateau en verre ou en ébonite, et l'on rend ces machines auto-excitatrices en employant de petites brosses en fil métallique qui produisent la première électrisation.

Lorsque l'on veut produire de très grandes quantités d'électricité, on emploie un nombre plus ou moins grand de plateaux parallèles qui alimentent tous les mêmes conducteurs, ils sont accouplés en quantité; on construit de ces machines qui ont douze plateaux.

48. **Comparaison des machines à frottement et des machines à induction.** — Les machines du second système sont infiniment préférables aux anciennes machines à frottement pour plusieurs raisons. D'abord dans les machines à frottement la charge augmente par additions successives

de quantités égales pour chaque tour, tandis que dans les machines à induction, la charge augmente par multiplication, on peut donc obtenir, avec ces dernières, des effets beaucoup plus intenses.

Elles sont également de beaucoup préférables au point de vue du rendement mécanique, en effet, dans une machine électrique, le seul travail utile est celui employé à séparer les charges d'électricités positive et négative qui ont toujours une tendance à se recombiner. Dans les machines à frottement, la plus grande partie du travail est employée à échauffer le plateau par son passage entre les coussins. Dans les appareils à induction au contraire, aucune partie du travail n'est transformée en chaleur puisqu'il n'y a pas de friction, la seule perte provient du frottement des axes et de la résistance de l'air.

C'est pour ces raisons que les anciennes machines de Nairne, de Ramsden, etc., sont complètement abandonnées.

Nous signalerons, en passant, l'analogie qui existe entre les machines à induction et les machines dynamo-électriques. Dans les deux, nous avons des inducteurs et un induit ; les armatures électrisées d'une part et les électro-aimants d'autre part. En outre, les machines de Holtz, Toepler, Wimshurst, etc., sont reversibles, c'est-à-dire que si l'on réunit deux de ces machines pôle à pôle et si l'on en met une en mouvement le plateau de l'autre se mettra également à tourner par suite des actions des charges d'électricité agissant les unes sur les autres.

CHAPITRE VI

DES EFFETS PRODUITS PAR L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

49. **Décharges conductives et décharges disruptives.** — Lorsque l'on met deux corps chargés à des potentiels différents en communication par un conducteur, il se produit un échange de fluide, il y a transport d'électricité de celui qui est au potentiel le plus élevé vers l'autre. Le premier se décharge vers le second, c'est ce que l'on appelle une *décharge conductive*.

L'électricité en passant du potentiel le plus élevé, à un potentiel moins élevé, restitue le travail qui avait été dépensé pour l'amener à cet état initial. Il en résulte que dans le cas d'une décharge conductive, il y a restitution d'énergie dans le conducteur ; cette énergie peut se manifester sous forme de chaleur, en échauffant et même en volatilisant le conducteur si la charge est suffisante.

Lorsque deux conducteurs sont séparés par un isolant, si l'on charge ces deux corps à des potentiels différents, par exemple l'un positivement, l'autre négativement, il arrive un moment où la tension est suffisante pour amener la combinaison des fluides de nom contraire malgré la présence de l'isolant ; il se produit alors une décharge *disruptive*. Si l'isolant est un corps solide, l'énergie de la décharge peut être assez grande pour le détruire.

Dans l'air, la décharge disruptive se manifeste sous la forme d'une étincelle dont le volume est d'autant plus grand que les conducteurs entre lesquels elle éclate ont une capacité plus considérable.

Ainsi que l'a prouvé Franklin, l'éclair n'est autre chose qu'une décharge disruptive, soit entre deux nuages, soit entre un nuage et la terre, la durée de l'éclair est extrêmement courte, et toute l'énergie de la décharge doit disparaître pendant cette fraction de seconde infiniment petite, c'est ce qui explique les effets destructifs de la foudre.

50. — La distance à laquelle se produit la décharge disruptive dépend de la différence de potentiel des corps en présence.

Lorsqu'un conducteur est terminé par une pointe, l'électricité dont il est chargé s'échappe en donnant lieu à une aigrette lumineuse, s'il est chargé positivement. Si, au contraire, il est chargé négativement il y a simplement formation d'une petite étoile brillante à l'extrémité de la pointe.

51. **Effets chimiques.** — Le passage de l'étincelle électrique peut produire des compositions et des décompositions chimiques. Un exemple, de réaction chimique produite par la décharge électrique, est montré par le *pistolet de Volta*.

Cet appareil (fig. 38) est formé par un tube A bouché à l'une de ses extrémités, deux tiges *a* et *b* isolées, aboutissent à l'intérieur. Le tube est rempli d'un mélange détonant, par exemple de l'hydrogène et de l'oxygène, et fermé par un bouchon en liège. Si l'on fait éclater une étincelle

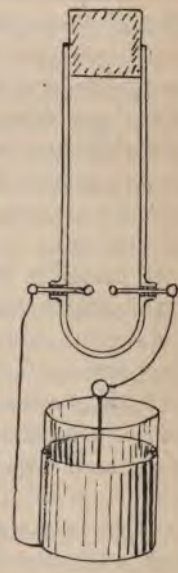


Fig. 38.

en *a b*, au moyen d'une bouteille de Leyde, par exemple, le gaz détone et le bouchon est projeté.

On emploie en chimie des appareils appelés eudiomètre qui sont construits comme l'indique la fig. 38, sauf qu'ils sont en verre et que les tiges *a b* sont en platine. On s'en sert pour déterminer la combinaison de certains gaz.

L'étincelle électrique transforme l'oxygène en ozone, dont on perçoit très nettement l'odeur quand on fait fonctionner une machine de Holtz.

On emploie quelquefois l'étincelle électrique pour allumer les mines.

52. **Effets physiologiques.** — Lorsque l'on fait passer une décharge électrique à travers le corps d'un être vivant, l'organisme reçoit un choc plus ou moins violent suivant l'énergie de la décharge, et suivant la sensibilité du sujet soumis aux expériences. On n'est pas d'accord sur la tension nécessaire pour tuer un homme, il est probable que cette tension diffère sensiblement d'un individu à un autre. En tous cas, les effets mortels de la foudre sont bien connus.

53. **Usages de l'électricité à l'état statique.** — On se sert surtout des machines électro-statiques en médecine pour produire des effets physiologiques.

Les phénomènes statiques ne sont guère utilisés dans l'industrie. Le professeur Lodge avait proposé pour purger l'air des manufactures des poussières en suspensions, de les attirer sur des plaques électrisées, mais aucune application en grand n'a été faite.

La connaissance des phénomènes se rapportant à l'électricité statique est indispensable pour l'étude des paratonnerres sur laquelle nous reviendrons en temps utile.

CHAPITRE VII

MAGNÉTISME

53. **Aimants naturels. Aimants artificiels.** — On trouve dans la nature un minerai de fer qui jouit de la propriété d'attirer les petits morceaux de fer, comme un corps électrisé attire les corps légers. *Cette propriété s'appelle le magnétisme*, le minerai qui la posséde se nomme *oxyde de fer magnétique* ou *aimant naturel*.

Lorsque nous plongeons un aimant dans la limaille de fer, nous constatons que celle-ci ne s'y attache pas d'une façon uniforme, mais que les propriétés attractives se concentrent plus spécialement en deux points opposés. En outre, l'aimant étant suspendu librement à un fil sans torsion, nous constatons qu'il se place toujours de lui-même dans une position telle que la ligne qui joint les deux points où l'attraction de la limaille de fer est maximum, se dirige du Nord au Sud.

Prenons une aiguille à tricoter, en acier, et frottons la toujours dans le même sens sur la pierre d'aimant en l'un des points où nous avons constaté que l'attraction de la limaille de fer se fait le plus vivement sentir, nous constaterons que cette aiguille a acquis les mêmes propriétés que l'aimant naturel, nous aurons ainsi produit un *aimant artificiel*.

54. — Si au lieu d'un fil d'acier, nous prenons un fil de fer bien pur pour faire notre expérience, par exemple un morceau de corde de piano, il nous sera impossible

de lui faire acquérir des propriétés magnétiques d'une *façon permanente*. Tant qu'il est en contact avec l'aimant, il possède des propriétés magnétiques, mais aussitôt qu'on l'en sépare, il n'est plus le siège d'aucun phénomène particulier.

La propriété que possède l'acier de conserver les propriétés magnétiques qui lui sont communiquées, et de permettre ainsi de fabriquer des aimants artificiels, s'appelle la *force coërcitive*.

55. **Répartition du magnétisme dans un barreau aimanté.** — Si nous prenons un barreau d'acier aimanté, et si nous le plongeons dans la limaille de fer, celle-ci ne s'attache qu'aux extrémités, la force magnétique n'est donc pas uniformément répartie sur toute la longueur. Si au moyen d'une balance (fig. 39), nous mesurons l'attraction exercée par différents points du barreau sur une petite masse de fer *c*, nous constaterons que l'attraction est nulle au milieu du barreau, et qu'elle va en augmentant vers les bouts; elle est la plus grande en deux points qui sont situés très près des extrémités.

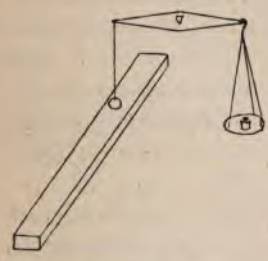


Fig. 39.

Les points où l'attraction est la plus grande sont nommés les pôles de l'aimant.

56. **Action réciproque de deux aimants.** — Si nous suspendons un barreau ou une aiguille aimantée par son milieu (fig. 40), nous constaterons qu'après quelques oscillations le barreau s'arrête dans la direction du méridien, c'est-à-dire dans la direction Nord, Sud. Si on le déplace de

cette position il y revient de lui-même dès qu'il est rendu libre.

Marquons de signes différents, les deux extrémités de l'aiguille, nous observerons que le même pôle de l'aimant se dirige toujours vers le Nord.

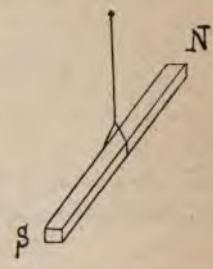


Fig. 40.

Prenons deux aiguilles aimantées, librement suspendues, et marquons d'un même signe le pôle de chacune de ces aiguilles se dirigeant vers le Nord. Si nous mettons ces deux aiguilles en présence, nous constaterons que les pôles marqués de la même façon se repoussent violemment, tandis que ceux de noms contraires s'attirent; ce qui s'exprime par la loi suivante :

Les pôles de même nom se repoussent; et les pôles de nom contraire s'attirent.

57. **Action directrice de la terre.** — La terre agit comme un vaste barreau aimanté dont les deux pôles seraient respectivement le pôle Nord et le pôle Sud du globe terrestre. Celui-ci agit sur l'aiguille aimantée comme le ferait un aimant. Le pôle Nord de la terre attire l'un des pôles magnétiques de l'aiguille et repousse l'autre, le pôle Sud agit d'une façon inverse. L'aiguille A B (fig. 41), posée sur un pivot O, sera soumise à l'action de deux forces parallèles F, F′ égales et de sens contraire, qui tendront à la faire tourner jusqu'à ce qu'elle soit venue dans la direction N S, position pour laquelle F et F′ agissent en sens opposé l'une à l'autre, suivant la même ligne et, par conséquent s'équilibrent.

58. **Système astatique.** — Lorsque l'on veut créer un sys-

tème magnétique soustrait à l'action de la terre, on fixe sur une même tige rigide, deux aiguilles aimantées N S,

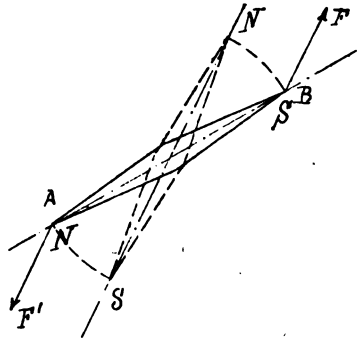


Fig. 41.

N' S', aussi identiques que possible, mais tournées en sens inverse. La terre exerce ainsi sur l'une des aiguilles une action directrice égale et de sens contraire à celle exercée sur l'autre, de sorte que ces deux actions s'annulent réciproquement.

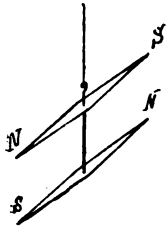


Fig. 42.

Un système composé comme nous venons de l'indiquer est dit *astatique*.

59. **Aimantation par influence.** — Un morceau de fer doux étant mis en contact avec un aimant naturel ou artificiel devient lui-même un aimant présentant deux pôles et jouissant de toutes les propriétés magnétiques.

L'aimantation par influence se produit également à

distance, et pour que le fer doux s'aimante, il n'est pas nécessaire qu'il y ait contact.

Soit N S (fig. 43), un barreau en acier aimanté, si l'on place dans le voisinage deux morceaux de fer doux A

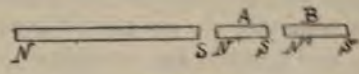


Fig. 43.

et B, ceux-ci subiront l'influence de N S, le sens de l'aimantation sera tel que deux pôles de noms contraires se trouvent toujours en regard l'un de l'autre.

60. **Corps dia-magnétiques et para-magnétiques.** — Tous les corps subissent plus ou moins l'action des aimants, seulement les uns sont attirés, alors que les autres sont repoussés; les premiers sont appelés *para-magnétiques*, les second *dia-magnétiques*.

Parmi les corps para-magnétiques, on peut citer le fer, le nikel, le cobalt, le chrôme, quelques sels de fer. Ainsi l'on peut fabriquer des aimants en nickel, mais ils sont moins forts que ceux en acier.

Les principaux corps repoussés par l'aimant ou dia-magnétiques, sont : le bismuth, l'antimoine et le zinc.

Tous les corps que nous avons cités subissent l'action des aimants d'une façon beaucoup moins intense que le fer.

61. **Loi de la grandeur des actions des pôles magnétiques. Unité de pôle.** — Si nous prenons un long barreau aimanté, mince, une aiguille à tricoter par exemple, et que nous la brisions en deux parties d'égale longueur, chacun des morceaux constitue un aimant complet. Nous pouvons briser chacun des deux fragments en deux, chaque quart

de l'aiguille primitive sera également un aimant et ainsi de suite. Nous voyons par là que l'on ne peut jamais obtenir un pôle unique sans qu'il soit accompagné d'un pôle de nom contraire.

Procurons nous deux aimants identiques, en brisant une aiguille aimantée de grande longueur, ainsi que nous venons de l'exposer. En mettant en présence deux pôles de même nom ou de nom contraire, il se repoussent ou s'attirent avec une force dont l'intensité peut être mesurée par une balance, par exemple (fig. 44). Nous pouvons déterminer que l'attraction ou la répulsion pour une distance *d* est d'un certain nombre de grammes.

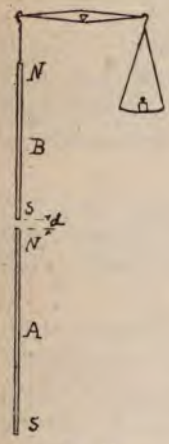


Fig. 44.

On constate que si, pour une distance donnée, 1 centimètre, par exemple, on a une force de 3 grammes, pour une distance de 2 centimètres la force ne sera plus que de 3/4 de gramme, tandis que pour 1/2 centimètre elle sera de $3 \times 4 = 12$ grammes. Ce qu'on exprime en disant : *Deux pôles égaux s'attirent ou se repoussent avec une force qui varie en raison inverse du carré de la distance.*

Si l'on place en *A* deux barreaux identiques, la force sera doublée dans tous les cas, si on emploie trois barreaux, elle sera triplée.

En mettant deux barreaux en *A* et *B* la force sera quadruplée, pour trois barreaux de part et d'autre elle sera multipliée par six.

L'attraction ou la répulsion est proportionnelle à l'intensité des pôles magnétiques en présence.

On prend comme *unité d'intensité de pôle*, celle d'un *pôle d'aimant qui, placé à une distance égale à l'unité, d'un autre pôle de même intensité, l'attire ou le repousse avec une force égale à l'unité de force.*

62. **Champ magnétique.** — Étant donné un aimant de grandes dimensions, si nous promenons dans toute la région de l'espace qui l'entoure, une petite aiguille aimantée, légère, librement suspendue, elle sera déviée de sa position naturelle *N S* pour occuper une autre position où elle sera en équilibre sous les actions combinées de la terre et du barreau. Si on l'écarte assez loin, il arrivera un moment où l'action de l'aimant ne se fera plus sentir d'une façon sensible.

Tout l'espace dans lequel s'exerce l'action du barreau aimanté s'appelle le champ magnétique de l'aimant.

63. **Lignes de force.** — Soit N S, un barreau aimanté

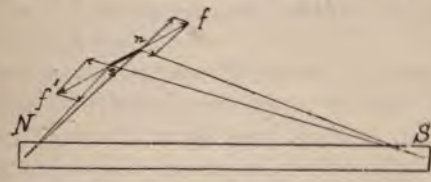


Fig. 45.

(fig. 45), plaçons à proximité une aiguille légère de petites dimensions *n s*, librement suspendue; cette aiguille est soumise à l'action de deux forces *f f'* égales et de sens contraires, résultantes des actions des pôles *N* et *S* sur *n* et *s*. Sous l'action de ces deux forces, *N S* va tourner

jusqu'à ce que *f* et *f'* soient dans le prolongement l'une de l'autre. Si nous promenons la petite aiguille dans tout le champ magnétique de l'aimant sa position d'équilibre en chaque point nous indiquera donc la direction des forces magnétiques en ce point; en raccordant par un trait continu toutes les positions successives de la petite aiguille, on obtient des lignes que l'on appelle *lignes de force* à cause de la propriété que nous venons d'indiquer. *La tangente en chaque point d'une ligne de force nous indique la direction de l'action magnétique en ce point.*

Voici un moyen de représenter matériellement les

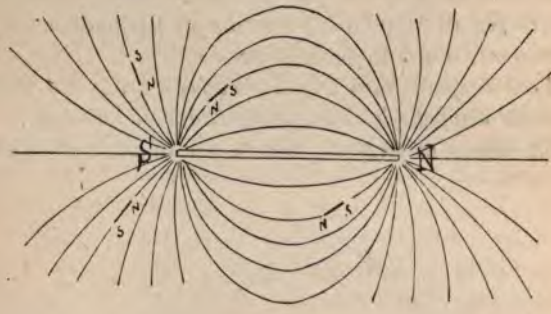


Fig. 46.

lignes de force. Plaçons un barreau aimanté sur une table horizontale, et sur le barreau posons une feuille de papier sur laquelle nous projetterons de la limaille de fer au moyen d'un tamis fin. Chaque particule de limaille en tombant va s'aimanter par influence, elle se trouvera donc dans la situation de la petite aiguille aimantée dont nous nous sommes servis pour explorer le champ

magnétique. Toutes ces particules en tombant sur le papier traceront ainsi d'une façon matérielle les lignes

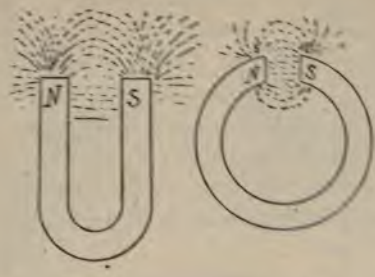


Fig. 47. Fig. 48.

de force du champ magnétique. La figure que l'on obtient par ce procédé s'appelle *le spectre magnétique de l'aimant* (fig. 46).

L'examen attentif du spectre magnétique nous montre que les lignes de force sont beaucoup plus serrées dans les régions avoisinant les pôles où les actions magnétiques sont les plus puissantes.

Ces figures nous donnent un moyen de nous rendre compte de la distribution des lignes de force dans un champ ; les figures 47 et 48 nous donnent une idée de cette distribution pour un aimant en fer à cheval et pour un aimant circulaire, dont les deux pôles sont très rapprochés l'un de l'autre. On peut voir que dans ces deux cas le champ magnétique est beaucoup plus restreint que dans celui d'un aimant droit.

Les figures 49 et 50 nous montrent la distribution des lignes de force dans le cas de deux pôles contraires ou de deux pôles égaux et de même nom, placés l'un à côté

de l'autre. Dans le premier cas, les lignes de force sont concentrées entre les deux pôles, tandis que dans le

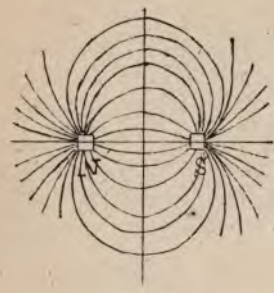


Fig. 49.

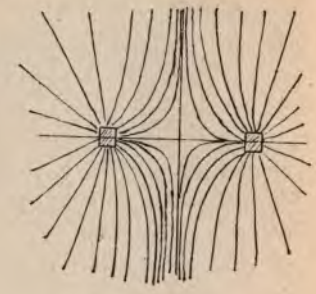


Fig. 50.

second cas on voit nettement que celles émanant de l'un des pôles exercent une répulsion sur celles qui partent de l'autre.

Si, entre deux pôles d'aimant NS (fig. 51), on place un

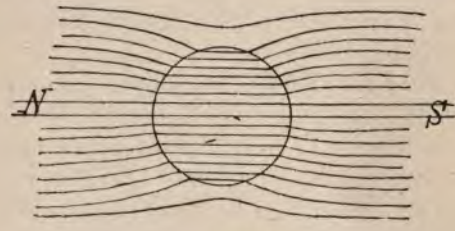


Fig. 51.

morceau de fer doux, la distribution des lignes de force dans le champ (fig. 49) sera considérablement modifiée, l'effet de ce morceau de fer doux sera de concentrer les lignes de force comme si elles passaient plus facilement

à travers le fer qu'au travers de l'air. En raison de cette propriété, on dit que le fer a une *perméabilité magnétique* plus grande que celle de l'air.

65. **Intensité du champ magnétique.** — Les spectres magnétiques nous donnent en chaque point la direction de l'action magnétique et jusqu'à un certain point la grandeur de ces actions, puisque les lignes sont d'autant plus rapprochées que l'action magnétique est plus intense.

On appelle *intensité d'un champ magnétique en un point déterminé, la grandeur de la force qui agirait sur un pôle magnétique d'une intensité égale à* 1, *et qui se trouverait au point considéré.*

66. **Représentation du champ magnétique.** — En mécanique, lorsque l'on considère la pression exercée sur une paroi, on définit cette pression en disant qu'elle est d'autant d'unités de force par unité de surface, par exemple (fig. 52), si nous considérons un vase prismatique, contenant de l'eau, et dont le fond est horizontal si nous supposons le volume d'eau, divisé en filets ayant tous le même poids, et représentons chacun de ces filets par une ligne verticale, nous obtiendrons ainsi la représentation matérielle d'un champ de forces parallèles; la pression sur le fond ABCD sera donnée par le nombre de lignes de force qui seront coupées. Si la pression est de 1 gr. par cent carré, chaque centimètre carré coupera une ligne de force.

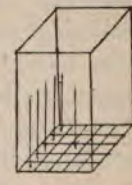


Fig. 52.

Nous pouvons de même représenter d'une façon matérielle un champ magnétique par ses lignes de force, suivant que le champ sera plus ou moins intense, elles seront plus ou moins rapprochées (fig. 53); la grandeur

de l'intensité du champ serait donnée en chaque point par le nombre de lignes de force que rencontrerait l'unité

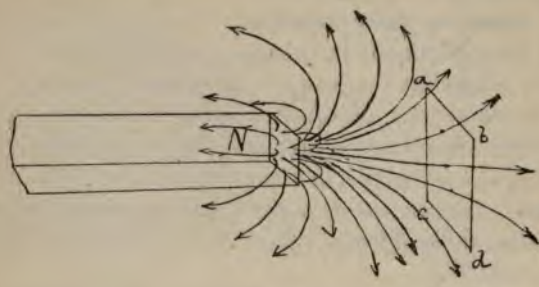


Fig. 53.

de surface. Un champ qui, en un point donné, aurait une intensité 10 serait celui dans lequel il y aurait 10 lignes de force par centimètre carré.

Dans un champ uniforme, les lignes de force sont parallèles et équidistantes; un exemple nous est fourni par la terre; en un lieu donné, l'intensité du champ magnétique, formé par la terre, est constante; en effet, si l'on déplace une aiguille aimantée, elle reste toujours parallèle à elle-même, et l'action directrice, exercée sur elle, est la même. Si nous considérons maintenant un pôle d'où partent autant de lignes de force que le pôle a d'unités d'intensité, le nombre de lignes de force interceptées par une surface abcd, égale à l'unité, nous donnera l'intensité du champ au point considéré. Comme l'intensité lumineuse, en un point d'un champ, éclairé par une source quelconque, nous serait donnée par le nombre de rayons qui seraient reçus par un écran de 1 centimètre carré, placé au point considéré.

La force d'un champ magnétique, sa densité ou son intensité sont des expressions synonymes.

67. **Moment magnétique.** — Supposons un champ magnétique uniforme, dont les lignes de force, par conséquent, sont parallèles et équidistantes, et dans ce champ plaçons un barreau aimanté NS (fig. 54), d'après ce que nous avons vu plus haut, nous savons que le pôle Nord sera sollicité par une force F, qui est égale au produit de l'intensité du pôle de l'aimant par l'intensité du champ magnétique; le pôle Sud sera sollicité par une force égale et de signe contraire F'.

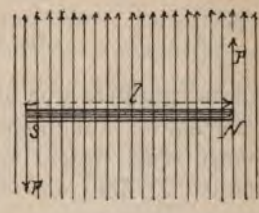


Fig. 54.

Le barreau aimanté tendra donc à tourner autour de son axe O, en vertu d'un couple, dont la grandeur est égale à : Intensité du champ $\times$. Intensité du pôle $\times$ l.

Si nous supposons l'intensité du champ égale à l'unité, le moment agissant sur l'aiguille sera égal à l'intensité de chacun des pôles, multipliée par la distance qui les sépare, c'est ce qu'on appelle le moment magnétique de l'aimant considéré.

68. **Théorie de Hughes.** (1). — D'après la théorie du professeur Hughes, chaque molécule du fer ou de l'acier, constituerait un aimant complet, ayant deux pôles de nom contraire et d'intensité égale; cette propriété serait inséparable de la matière comme les autres propriétés physiques et chimiques, on ne peut par aucun moyen les augmenter ou les diminuer.

(1) *Journal of the Society of Telegraph Engineers and Electricians.* Vol. XII, nº 49. 1883.

Dans une barre d'acier aimanté, ces molécules forment une chaîne magnétique continue, c'est-à-dire que les molécules sont orientées toutes de la même façon (fig. 55a)

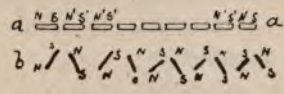


Fig. 55a et 55b.

et si l'on considère une file de molécules, tous les pôles intermédiaires s'annulent réciproquement; les pôles extrêmes seuls restent sensibles. Dans une barre non aimantée (fig. 55b), au contraire, les molécules auraient leurs axes magnétiques dirigés dans tous les sens, de façon que toutes les actions s'accumuleraient, la chaîne des éléments magnétiques serait discontinue. Si, par un procédé quelconque, nous arrivons à déplacer les molécules de façon à donner à leur axe magnétique une direction commune (fig. 55a), le barreau sera composé d'une série de chaînes magnétiques parallèles, présentant des pôles magnétiques, libres à leurs extrémités; notre barreau sera devenu un aimant.

D'après cette théorie pour aimanter une barre d'acier, il faudrait faire tourner chaque molécule autour de son axe; nous avons un moyen d'arriver à ce résultat en mettant le barreau sur le trajet des lignes de force d'un champ magnétique puissant, chaque molécule se trouvera alors dans les conditions des fragments de limaille de fer quand on produit les spectres magnétiques.

La formation des chaînes magnétiques sera d'autant plus complète que les molécules se déplaceront plus facilement, et que le champ magnétique sera plus intense.

Dans le fer ou l'acier très doux, les molécules peuvent se mouvoir avec la plus grande facilité et les chaînes sont continues, mais plus l'acier est dur et plus petit est l'angle dont chaque molécule peut se déplacer pour une force donnée. Dans ce dernier cas, les chaînes sont plus ou moins discontinues, et le magnétisme sensible extérieurement est faible. Mais d'autre part, dans l'acier, les molécules une fois formées en chaînes magnétiques, ne reviennent que difficilement à leur position primitive, et plus l'acier est dur plus la force coërcitive est grande, et par conséquent l'aimantation est plus permanente. Dans le fer doux, au contraire, les chaînes magnétiques se défont avec autant de facilité qu'elles s'étaient formées, et la moindre action mécanique extérieure, vibration, choc, échauffement, suffit pour détruire le magnétisme.

Nous pouvons donner une image exacte de ce que nous venons d'exposer, en prenant un tube de verre rempli de limaille d'acier; si nous plaçons ce tube dans un champ magnétique puissant, les particules de métal vont s'orienter en chaînes magnétiques continues, et notre tube se comportera comme un barreau aimanté. Mais si nous le secouons fortement, les chaînes seront détruites et tout magnétisme sensible disparaît.

Il résulte de là, que pour obtenir des aimants conservant bien leur magnétisme, il faut les fabriquer au moyen d'acier très dur et les soumettre à l'action du champ magnétique le plus intense possible, toutes les actions qui ont pour résultat de donner de la mobilité aux molécules, le choc, l'échauffement, les vibrations, favorisant la désaimantation.

69. **Armatures des aimants.** — Pour conserver l'aimantation, il faut faire en sorte que les chaînes magnétiques

soient toujours continues ; c'est pourquoi on réunit par un morceau de fer doux les pôles des aimants en fer à

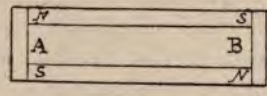


Fig. 56.

cheval pour empêcher leur désaimantation. Lorsque l'on doit conserver des aimants droits, il faut les placer parallèlement, leurs pôles de noms contraires en regard l'un de l'autre, et les réunir par des pièces A. B en fer doux (fig. 56).

70. **Ecrans magnétiques.** — Dans certains cas on doit soustraire un appareil aux influences magnétiques ; on utilise pour cela les propriétés du fer doux (64). On enveloppe l'appareil d'une cage en fer, mais celle-ci doit être suffisamment épaisse pour qu'elle puisse donner passage à toutes les lignes de force.

Ce procédé est employé quand on doit se servir d'un galvanomètre dans un endroit où se produisent des influences magnétiques variables. On emploie quelquefois des boîtes en fer pour protéger les montres contre le magnétisme des machines dynamo-électriques ; ce moyen n'est pas complètement efficace parce que l'on devrait donner aux étuis une épaisseur telle que leur emploi serait impossible.

CHAPITRE VIII

COURANT ÉLECTRIQUE

71. — Ainsi que nous avons eu l'occasion de le constater à différentes reprises, lorsqu'un corps est chargé d'électricité, cette charge n'est pas intimement liée au conducteur qui la porte; elle peut se déplacer à sa surface, et passer d'un conducteur à un autre par contact ou par l'intermédiaire d'un fil conducteur.

Lorsque nous réunissons par un fil métallique deux conducteurs à des potentiels différents, une partie de la charge passe de celui dont le potentiel est le plus élevé vers l'autre, jusqu'à ce que tous les deux soient arrivés au même niveau électrique ou potentiel. Il se produit dans le conducteur de jonction un flux, un *courant électrique*, qui persiste tant qu'il y a une différence de potentiel, une force électromotrice. Le courant va du corps dont le potentiel est le plus élevé vers celui où il est le plus bas.

L'étude des propriétés qui sont communiquées aux conducteur par le passage d'un courant électrique, est de la plus haute importance, à cause des nombreuses applications que l'on en fait dans la pratique.

Dans l'industrie, on se sert de sources d'électricité maintenant une différence de potentiel constante entre les extrémités du conducteur dont on utilise les propriétés. On a ainsi un courant continu, tandis que quand on réunit, par exemple, les deux armatures d'un condensateur par un fil fin il se produit dans ce dernier un cou-

rant qui cesse dès que les deux armatures sont arrivées au même potentiel.

Nous allons étudier les propriétés des courants, indépendamment des causes qui les produisent; en d'autres termes, nous allons étudier ce qui se passe dans un conducteur, lorsque ses extrémités sont maintenues à des potentiels différents, sans tenir compte du procédé employé pour produire cette force électromotrice.

72. — Procédons par comparaison avec les courants liquides; dans ces derniers, nous avons à considérer les éléments suivants : 1° la pression ou hauteur de charge qui détermine l'écoulement; 2° les résistances apportées par la conduite au mouvement du fluide; 3° la quantité de liquide qui s'écoule pendant un certain temps par une section donnée du tuyau.

Dans un courant électrique, nous avons de même à tenir compte de trois éléments analogues :

1° La force électromotrice *ou différence de potentiel qui correspond à la pression ou hauteur de charge*;

2° La résistance *du conducteur qui est analogue à la perte de charge qui se produit dans la conduite*;

3° L'intensité du courant *ou débit par seconde*.

73. **Force électromotrice.** — Nous avons vu, au premier chapitre, différents moyens de la produire; nous y reviendrons plus en détail en temps utile.

74. **Résistance. Conductibilité.** — Tous les corps apportent des entraves plus ou moins grandes au passage du courant électrique; il faut entendre par là que si l'on réunit deux corps de capacité quelconque, se trouvant à des potentiels différents, le courant met un certain temps, plus ou moins long, pour passer de l'un à l'autre, suivant la nature du conducteur qui les réunit. Un mauvais

conducteur ne laisse pas passer l'électricité aussi rapidement qu'un bon conducteur.

La résistance dépend de la nature du conducteur et de ses dimensions. Ainsi un fil de cuivre présente moins de résistance qu'un fil de fer de mêmes dimensions ; le cuivre est meilleur conducteur que le fer, l'argent est meilleur conducteur que le cuivre.

Pour un conducteur d'une matière déterminée, la résistance est inversement proportionnelle à la section et directement proportionnelle à la longueur. C'est-à-dire qu'un fil de cuivre, par exemple, de 10 mètres de long et de 1 millimètre carré de section, est deux fois plus résistant qu'un fil de même longueur et 2 millimètres carrés de section. Un fil de 2 millimètres de diamètre est quatre fois moins résistant qu'un fil de 1 millimètre. Pour une section donnée, un conducteur de 20 mètres de long est deux fois plus résistant qu'un conducteur de même matière et de longueur moitié moindre. Cette loi peut s'exprimer par la formule suivante :

$$\text{Résistance} = K \times \frac{\text{longueur}}{\text{section}}.$$

K est une quantité constante pour chaque matière, mais qui varie d'une substance à l'autre.

On a donné, à l'inverse de la résistance, le nom de *conductibilité*. La *conductibilité spécifique* d'un corps, comme son poids spécifique, est la conductibilité rapportée à l'unité de volume :

$$\text{Conductibilité} = \frac{1}{K} \times \frac{\text{section}}{\text{longueur}}.$$

Si on prend un conducteur ayant l'unité de section, et l'unité de longueur, on obtient la conductibilité spéci-

fique $= \frac{1}{K}$ — K est la résistance spécifique du conducteur.

75. **Intensité.** — L'intensité d'un courant électrique, est la quantité d'électricité que débite ce courant pendant l'unité de temps, pendant une seconde.

Le courant est constant lorsque la quantité d'électricité, débitée par le conducteur pendant l'unité de temps, est toujours la même.

Pour un circuit déterminé, si on maintient constante la différence de potentiel ou force électromotrice aux extrémités, le débit et par conséquent l'intensité du courant sera constant. On peut comparer un courant constant au courant d'eau qui s'établit dans une conduite lorsque la hauteur de charge, la pression est maintenue constante.

Dans un circuit parcouru par un courant d'intensité constante, cette *intensité est la même en tous les points du circuit, alors même que celui-ci serait formé de parties ayant des résistances inégales*, par exemple, des parties en métaux différents ou bien ayant des diamètres variables. Ce fait s'explique facilement, dans un circuit quelconque toutes les sections doivent donner le même débit dans l'unité de temps, car si l'une d'elle débitait moins qu'une autre, si l'intensité donc y était moins grande, l'électricité s'y accumulerait indéfiniment, ce qui ne peut se produire. Lorsqu'un liquide s'écoule d'un réservoir dans un autre, les niveaux étant maintenus constants, à travers une conduite formée de tronçons de diamètres différents, il s'établit un courant uniforme dont le débit est le même en tous les points, c'est-à-dire que la quantité d'eau passant par seconde dans chaque section est la

même, un seul élément varie, c'est la vitesse de l'eau qui est plus grande dans les tuyaux minces et présentant plus de résistance que dans ceux dont le diamètre est plus grand et qui produisent une perte de charge moins grande.

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Quantité débitée}}{\text{Temps}}.$$

76. **Relation entre la force électromotrice, la résistance et l'intensité. Loi d'Ohm.** — On constate *par expérience* que, étant donné un conducteur déterminé, entre les extrémités duquel on maintient une différence de potentiel constante, l'intensité du courant dépend uniquement de la résistance du circuit qu'il doit parcourir. Ainsi si l'on double la résistance, l'intensité devient deux fois plus petite, si l'on diminue la résistance de moitié, l'intensité est doublée.

D'autre part, si en maintenant la résistance constante on fait varier la force électromotrice, on constate que l'intensité varie dans la même proportion.

Il résulte de là que si l'on fait changer à la fois la résistance et la force électromotrice, l'*intensité du courant variera en raison directe de la différence de potentiel et en raison inverse de la résistance.*

Cette loi, découverte expérimentalement par le physicien Ohm, est rigoureusement exacte lorsqu'il s'agit des courants comme ceux que l'on emploie généralement. Elle peut s'exprimer par la formule suivante :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Force électromotrice}}{\text{Résistance}}.$$

La loi d'Ohm nous montre, que, si pour faire circuler dans un circuit déterminé un certain courant, il nous

faut une pression ou force électromotrice, que je représenterai par E, par exemple, pour faire circuler dans le même circuit un courant d'intensité double, il faut une pression double, et par conséquent que la perte de pression qui existe entre les deux extrémités d'un conducteur donné, est directement proportionnelle à l'intensité du courant.

Nous voyons par là que l'on ne peut pas assimiler complètement un courant électrique à un courant liquide. Dans le cas de l'électricité, la résistance dépend exclusivement de la nature du conducteur et nullement de la force électromotrice, tandis que la résistance, qu'offre une conduite au mouvement de l'eau, varie avec la vitesse d'écoulement et par conséquent avec la pression.

La loi d'Ohm s'applique à toutes les substances, aussi bien celles qui sont bonnes conductrices, comme l'argent, le cuivre, l'or, le platine, le fer, qu'aux conducteurs médiocres ou aux mauvais conducteurs comme le charbon, le caoutchouc et la gutta-percha.

77. **Courants dérivés.** — Jusqu'à présent nous avons toujours considéré ce qui se passe dans un circuit simple, c'est-à-dire composé d'un conducteur unique. Examinons maintenant la façon de se comporter des circuits complexes.

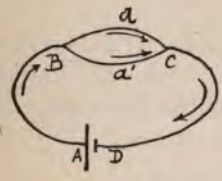


Fig. 57.

Soit un circuit A B C D (fig. 57), comprenant entre A et D une source de force électromotrice; entre les points B et C le conducteur est double, en B deux chemins se présentent au courant, B*a*C et B*a*'C. Le courant se partagera entre les deux voies; si celles-ci ont la même résistance la moitié s'écoulera

par chacune des deux branches. Si a et a' ont des résistances différentes, le partage se fera d'après la grandeur de ces résistances. La loi d'Ohm nous donne l'intensité dans chacune des branches.

$$\text{Intensité B } a \text{ C} = \frac{\text{différence de potentiel (B — C)}}{\text{résistance B } a \text{ C}} \quad . \; . \; (1)$$

$$\text{Intensité B } a' \text{ C} = \frac{\text{différence de potentiel (B — C)}}{\text{résistance B } a' \text{ C}} \quad . \; . \; (2)$$

Divisant ces deux égalités :

$$\frac{\text{Intensité B } a \text{ C}}{\text{Intensité B } a' \text{ C}} = \frac{\text{résistance B } a' \text{ C}}{\text{résistance B } a \text{ C}} \quad . \; . \; . \; . \; (3)$$

Le partage du courant se fait donc de façon que les intensités, dans chacune des branches, sont en raison inverse des résistances, c'est-à-dire que si a est deux fois plus résistante que a', l'intensité dans BaC sera deux fois plus petite que dans Ba'C.

Le débit se faisant par deux conducteurs au lieu d'un seul, l'intensité totale sera donnée en faisant la somme des deux intensités (1) et (2).

$$\text{Intensité totale} = \frac{\text{différence de potentiel B C}}{\text{résistance B } a \text{ C}}$$

$$+ \frac{\text{différence de potentiel B C}}{\text{résistance B } a' \text{ C}} \quad . \; . \; (4)$$

Nous pourrions remplacer les deux branches B a C et B à C par un conducteur unique dont la résistance serait telle que le débit total ne soit pas changé, cette résistance nous est donnée par la formule d'Ohm.

$$\text{Intensité totale} = \frac{\text{différence de potentiel B C}}{\text{résistance inconnue}} \quad . \; . \; . \; . \; (5)$$

Les égalités (4) et (5) nous donnent :

$$\frac{\text{Différence de potentiel B C}}{\text{résistance inconnue}} = \frac{\text{différence de potent. B C}}{\text{résistance B } a \text{ C}} + \frac{\text{différence de potentiel B C}}{\text{résistance B } a' \text{ C}}$$

Ou bien :

$$\frac{1}{\text{Résistance inconnue}} = \frac{1}{\text{résistance B } a \text{ C}} + \frac{1}{\text{résistance B } a' \text{ C}} \cdot \cdot \cdot (6)$$

Donc, *étant donné, un circuit présentant une dérivation, on ne changera rien au régime, si l'on remplace les deux conducteurs dérivés par un conducteur unique tel que l'inverse de sa résistance soit égale à la somme des inverses des résistances des deux dérivations.*

On peut dire également que l'on peut sans changer le régime du courant, remplacer les deux conducteurs par un fil unique dont la conductibilité soit égale à la somme des conductibilités des deux autres.

78. **Cas de trois conducteurs.** — Si le circuit principal au lieu de se diviser en deux se divisait en trois autres dont les résistances seraient respectivement a, b, c (fig. 56),

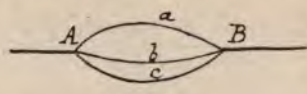


Fig. 58.

on pourrait, d'après ce que nous avons vu plus haut, remplacer a et b par un conducteur unique de résistance r, telle que : $\frac{1}{r} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$.

On peut alors substituer à r et c un conducteur unique de résistance, telle que $\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r} + \frac{1}{c}$ donc :

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \ldots (7)$$

d'où l'on tire : $$r_1 = \frac{abc}{ab + bc + ac} \ldots (8)$$

Si l'*on avait un nombre quelconque de conducteurs, on pourrait toujours les remplacer par un conducteur unique dont la conductibilité serait égale à la somme des conductibilités de tous les conducteurs partiels.*

Il résulte delà que la résistance du fil unique substitué à plusieurs conducteurs placés en dérivation, doit avoir une conductibilité plus grande et par conséquent une résistance plus faible que chacun des conducteurs partiels.

79. **Lois de Kirchoff.** — Soit un circuit complet (fig. 59) entre A et D se trouve une force électromotrice que j'appelle E. Entre B et C le courant se divise entre trois conducteurs *a*, *b*, *c*; les différentes parties sont parcourues par des courants qui se dirigent dans le sens des flèches, et j'appelle I, i_a, i_b, i_c les intensités de ces courants. Kirchoff a établi par expérience les lois suivantes :

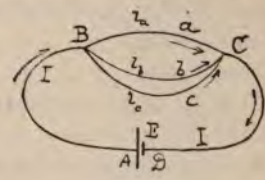


Fig. 59.

Première loi. — Si nous considérons un point où aboutissent plusieurs conducteurs, B, par exemple, le courant I s'en approche, tandis que i_a, i_b, i_c s'en éloignent. *La somme des intensités de tous les courants qui*

s'approchent du point de bifurcation, est égale à la somme des intensités de tous les courants qui s'en éloignent.

Deuxième loi. — Considérons (fig. 60) le circuit M N P Q R S_1 dans lequel se trouvent deux forces électro-motrices E_1, E_2, soient I_1, I_2, I_3, les intensités dans MRN, MN et MPQN, et *a*, *b*, *c*, les résistances de ces trois portions du circuit. Entre ces diverses grandeurs il existe des relations données par la loi suivante : *dans toute figure fermée, la somme des produits des résistances par les intensités correspondantes est égale à la somme algébrique des forces électro-motrices.*

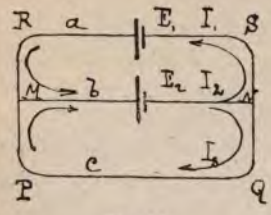


Fig. 60.

Dans le cas qui nous occupe, nous avons trois figures fermées, MNRS, MNPQ et PQRS.

Dans MNRS, nous avons $I_1a + I_2b = E_2 - E_1$.

Dans MNPQ, » » $I_2b + I_3c = E_2$.

Dans PQRS, » » $I_1a + I_3c = E_1$.

E_1 et E_2 étant supposées dirigées en sens contraire, doivent être prises avec des signes différents.

80. **Propriétés générales des courants.** — Le courant électrique est le résultat d'une transformation soit de l'énergie mécanique, calorifique, chimique ; l'électricité peut être utilisée pour passer de l'une de ces formes de l'énergie à une autre forme. Ainsi, si l'on emploie une machine pour maintenir entre deux points d'un conducteur une différence de potentiel constante et par conséquent produire un courant, l'énergie dépensée dans le moteur peut être restituée par le courant sous une autre forme ; si l'on fait

passer ce courant au travers d'un composé chimique, le courant décomposera ce corps et mettra ainsi à notre disposition de l'énergie chimique (décomposition de l'eau).

Si nous envoyons ce courant dans un conducteur résistant, celui-ci s'échauffera et l'énergie du courant se retrouvera sous forme de chaleur ou de lumière si la température à laquelle le conducteur est porté est suffisamment élevée (lampes à incandescence).

Le courant étant envoyé dans un système de conducteurs convenablement disposés nous restituera le travail qui a été dépensé pour l'engendrer. (Transport de l'énergie).

Tous ces phenomènes sont régis par les lois de la transformation et de la conservation de l'énergie. Le courant ne crée rien, il ne fait que nous restituer, sous une forme ou sous une autre, l'énergie que nous avons dépensée pour le produire, déduction faite de toutes les pertes inhérentes aux transformations successives.

81. **Action chimique des courants. Loi de Faraday.** — Les courants électriques en passant à travers les liquides conducteurs en déterminent la décomposition. Formons un circuit comprenant une source d'électricité (fig. 61), et un conducteur dans lequel nous intercalons un appareil V, nommé Voltamètre et qui se compose d'un vase en verre A, au fond duquel aboutissent deux conducteurs de platine *b* et *c* en communication avec les bornes B et C.

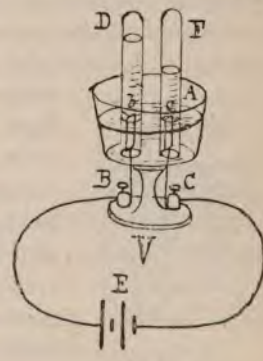


Fig. 61.

On remplit A d'eau distillée à laquelle on ajoute un peu d'acide sulfurique pour la rendre plus conductrice, et au-dessus des deux fils de platine, on place deux cloches renversées D, F, contenant également de l'eau acidulée. Aussitôt que le courant est établi, une vive effervescence se manifeste dans les deux cloches, des bulles de gaz se dégagent des électrodes en platine et sont recueillies dans les cloches.

On s'aperçoit bientôt que le volume de gaz contenu dans l'un des récipients est double de celui que renferme l'autre et en déterminant la nature des gaz, on trouve d'une part, que le volume le plus grand est de l'hydrogène et que l'autre cloche contient de l'oxygène. Le courant électrique a produit la décomposition de l'eau en ses deux éléments.

Lorsque le courant est faible, le dégagement de gaz est très modéré, mais si l'on augmente l'intensité on s'aperçoit que la décomposition devient de plus en plus active, il y a donc une relation entre l'intensité du courant et la quantité d'eau décomposée dans un temps donné.

Au lieu d'un voltamètre à eau, prenons une solution de sulfate de cuivre que nous plaçons dans une cuve où plongent deux lames de platine A et B. Intercalons cet appareil dans le courant, et au bout de quelques instants nous constaterons que l'une des plaques se recouvre de cuivre métallique qui ne peut naturellement provenir que de la décomposition du sulfate de cuivre dans laquelle elle est plongée.

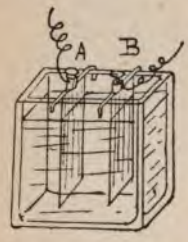


Fig. 62.

Première loi. — *Les expériences de Faraday ont con-*

duit aux lois suivantes : lorsqu'un liquide décomposable est traversé par un courant, la quantié de composants mise en liberté est directement proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé le voltamètre et par conséquent à l'intensité du courant.

Ainsi l'unité de quantité d'électricité met toujours en liberté la même quantité d'hydrogène et d'oxygène en passant à travers l'eau.

Deuxième loi. — Si l'on fait passer un même courant à travers une série de voltamètres contenant des solutions différentes, par exemple, de l'eau acidulée, du sulfate de cuivre, du nitrate d'argent, du chlorure de nickel ; *le courant mettra en liberté des poids d'éléments qui seront entre eux comme leurs équivalents électro-chimiques ;* ainsi les poids d'hydrogène, de cuivre, d'argent, de nickel, seront entre eux comme les nombres 1 ; 63 ; 107,66 ; 29,3.

82. **Action calorifique et mécanique. Loi de Joule.** — Le courant électrique en passant au travers d'un fil resistant l'échauffe, et l'élévation de température est d'autant plus considérable que le courant est plus intense. En mesurant l'intensité du courant, et la quantité de chaleur dégagée dans un temps donné, Joule est arrivé à la relation exprimée par la loi suivante : *La quantité de chaleur produite par le passage d'un courant, ou ce qui est équivalent, le travail produit par un courant pendant un certain temps, est égal au produit du carré de l'intensité par la résistance du circuit et par le temps.*

$$\text{Énergie} = (\text{intensité})^2 \times \text{résistance} \times \text{temps} \quad . \; . \; . \; (1).$$

Comme la loi d'Ohm nous donne la relation :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{force électromotrice}}{\text{résistance}} \quad . \; . \; . \; (2).$$

Nous pouvons déduire de (1) et (2).

Énergie = force électrom. × intensité × temps. . (3).

Ou dans l'unité de temps.

Énergie = force électromotrice × intensité . . . (4).

L'énergie développée pendant l'unité de temps, dans un circuit parcouru par un courant, est donc égale au produit de la force électromotrice nécessaire pour faire circuler le courant par l'intensité.

83. — Les lois d'Ohm, de Faraday et de Joule, nous donnent les relations qui existent entre les différents éléments des courants; nous nous servirons plus tard de ces relations pour établir un système d'unités servant à exprimer les grandeurs électriques.

CHAPITRE IX

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné les principaux phénomènes dont un conducteur devient le siège par suite du passage du courant, il nous faut maintenant indiquer quelles sont les manifestations extérieures que peut produire le courant. La principale d'entre elles a été découverte par Oersted, en 1820, je veux parler de l'action magnétique.

84. **Champ magnétique produit par un courant.** — Un conducteur en cuivre étant traversé par un courant intense, si on le promène dans de la limaille de fer, il attirera des fragments de limaille comme le ferait une aiguille aimantée. Un courant électrique produit donc autour de lui un champ magnétique que nous allons étudier par le même procédé que celui dont nous avons fait usage pour les aimants.

Prenons un conducteur en cuivre d'assez fort diamètre pour qu'il soit possible de le faire parcourir par un courant intense, plaçons ce conducteur verticalement en lui faisant traverser un carton horizontal AB, sur lequel nous projetterons de la limaille de fer au moyen d'un tamis (fig. 63). Les fragments de métal se disposeront en cercles concentriques dont le centre coïncide avec l'axe du conducteur. Si nous voulons nous rendre compte du sens des actions magnétiques qui se produisent, il suffit d'explorer le champ au moyen d'une petite aiguille aimantée, on trouve ainsi que si l'on fait mouvoir l'aiguille

autour du conducteur CD, elle reste toujours tangente à une circonférence ayant son centre sur l'axe du fil, les

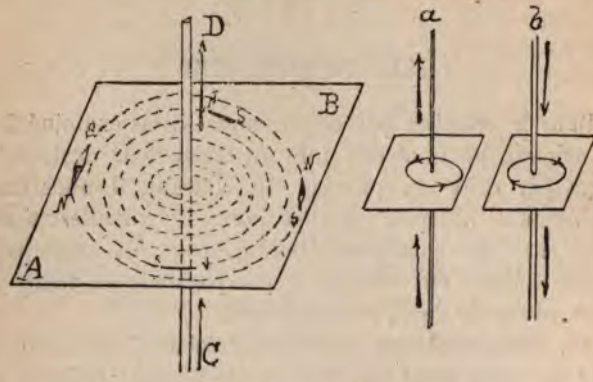


Fig. 63.

lignes de force allant du Nord au Sud sont dirigées de droite à gauche quand le courant va de bas en haut (fig. 63 *a*). Si l'on renverse le courant, l'aiguille aimantée qui sert à l'exploration fait un demi tour et les lignes de force vont dans le sens opposé, de gauche à droite (fig. 63 *b*).

Plaçons un conducteur AB (fig. 64) au-dessus d'une

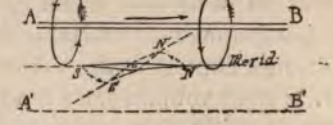


Fig. 64.

aiguille aimantée qui se trouve dans le méridien magné-

tique, puis faisons parcourir le conducteur par un courant allant de A vers B ; d'après ce que nous venons de voir, ce courant crée un champ magnétique dont les lignes de force ont la direction indiquée sur la figure ; les forces du champ agissant sur l'aiguille NS vont tendre à déplacer NS vers N'S' jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre l'action directrice produite par le champ magnétique du courant et celle de la terre. Si le courant est très intense, son action peut être très grande, par rapport à celle de la terre et alors l'aiguille se place parallèlement aux lignes de forces du courant, c'est-à-dire, perpendiculairement à celui-ci.

La direction du champ changeant avec celle du courant, il en résulte que le sens de la déviation de l'aiguille changera si le sens du courant change également. Il est facile de voir que, dans le cas de la figure 64, si le conducteur était placé en A'B' sous l'aiguille, le sens de la déviation changerait, le pôle N de l'aimant ayant toujours une tendance à se diriger dans le sens des lignes de force.

85. **Règles d'Ampère et de Faraday.** — *Ampère* a formulé la règle mnémotechnique suivante qui permet de retenir facilement la relation qui existe entre le sens du courant et celui de la déviation de l'aiguille.

Si l'on suppose un observateur couché dans le sens du courant, celui-ci entrant du côté des pieds et sortant du côté de la tête, l'observateur étant tourné vers l'aiguille, verra toujours le pôle Nord dévier à sa gauche.

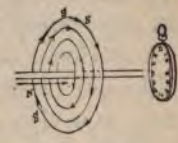


Fig. 65.

Règle de Faraday. — Voici la formule, donnée par Faraday, pour arriver au même but. *Si nous supposons une montre placée en face du con-*

ducteur, de façon que le courant se dirige vers le centre du cadran (fig. 65), *le pôle nord de l'aiguille aimantée sera toujours dévié dans le sens du mouvement des aiguilles de la montre.*

86. **Champ magnétique d'un courant circulaire fermé.** — Si on enroule le conducteur de façon à lui donner la forme d'une circonférence (fig. 66), toutes les lignes de force à

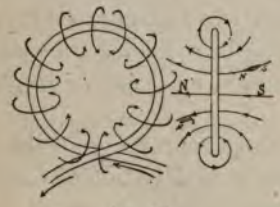


Fig. 66.

Fig. 67.

l'intérieur du conducteur seront dirigées dans le même sens, et le champ magnétique ainsi obtenu, sera très puissant, comme on peut s'en assurer en produisant le fantôme magnétique comme il est représenté par la figure 67. Cette expérience nous montre que le champ magnétique, produit par un courant circulaire fermé, est le même que celui que donnerait un barreau aimanté ayant une longueur égale à l'épaisseur du conducteur, et comme section transversale, la surface du courant circulaire.

Un courant, fermé au point de vue magnétique, peut donc être remplacé par un feuillet aimanté.

L'expérience montre que le moment magnétique du feuillet qui produirait le même champ que le courant formé considéré, est numériquement égal : *au produit de l'aire, circonscrite par le conducteur, par l'intensité du courant qui parcourt celui-ci.*

87. **Actions réciproques des courants.** — Si nous mettons en présence deux courants circulaires parallèles, AB et A'B', (fig. 68), ces courants, au point de vue de leur action extérieure, peuvent être remplacés par des aimants NS, N'S' qui produiraient le même champ magnétique. Si les courants que parcourent les deux conducteurs sont de même sens, les aimants ayant leurs pôles de nom contraire en regard, s'attireront et vice-versa. Par conséquent, *deux conducteurs, parcourus par des courants de même sens, doivent s'attirer et se repousser s'ils sont de sens contraire.* C'est en effet ce que montre l'expérience suivante :

Fig. 68.

Plaçons l'une au-dessus de l'autre deux bobines plates A, B, (fig. 69), le courant est amené à A par des godets à

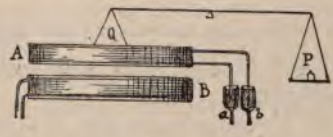


Fig. 69.

mercure *a b*. Équilibrons A au moyen de poids P, puis faisons passer un courant dans les deux bobines.

L'équilibre est rompu, si les courants sont de même sens, pour ramener A à sa position initiale, il faut ajouter des poids en P. Quand les courants vont en sens invers, il faut au contraire placer les poids en Q.

88. **Expériences d'Ampère.** — Ce que nous avons dit des courants fermés circulaires, peut également s'appliquer aux conducteurs fermés, de forme quelconque; mais

dans ce cas, la formule qui permet de déterminer les éléments du champ magnétique (86), n'est pas aussi simple.

Si nous suspendons un cadre, parcouru par un courant (fig. 70), de telle façon qu'il puisse se mouvoir autour d'un

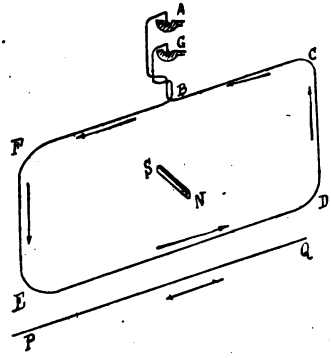


Fig. 70.

axe vertical, ce cadre sera soumis à l'action directrice de la terre, il tendra à se placer perpendiculairement au méridien magnétique.

Il est facile de s'expliquer ce fait si l'on suppose le courant, remplacé par un aimant NS, qui produirait le même champ magnétique.

Pour les mêmes raisons le circuit mobile subira également l'action directrice d'un aimant et en général d'un champ magnétique quelconque.

Un courant, parcourant un conducteur rectiligne PQ, agira sur le cadre comme il agirait sur l'aimant NS. Le courant mobile tendra toujours à se placer de telle façon que le pôle N de l'aimant soit dirigé vers la gauche d'un observateur qui nagerait dans le sens du courant en regardant ce pôle nord.

Nous pouvons construire des cadres mobiles astatiques comme nous avons construit des systèmes magnétiques qui n'étaient pas soumis à l'action de la terre (fig. 71). La

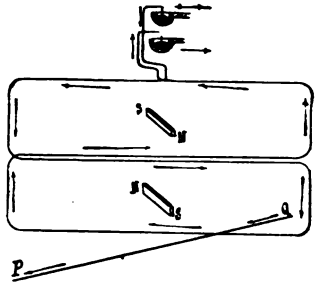


Fig. 71.

partie supérieure produit un champ magnétique égal et de sens contraire à celui auquel donne lieu l'inférieure, la résultante de l'action de la terre sur tout le système, est donc nulle.

Cet appareil pourra nous servir à démontrer sous une autre forme les actions réciproques des courants.

Si nous faisons parcourir PQ par un courant de sens contraire à celui qui parcourt FG, les deux fils se mettront en croix, si alors on renverse le sens du courant dans l'un des conducteurs, PQ, par exemple, FG viendra se mettre parallèlement à PQ.

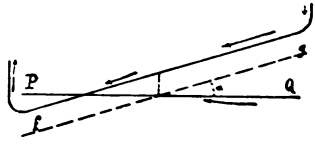


Fig. 72.

On pourra constater également, que si les deux circuits font entre eux un certain angle, *ils s'attirent si les deux courants se dirigent vers le sommet de l'angle* (fig. 72), *ou s'ils s'en éloignent tous les deux* (fig. 72a). *Si, au contraire,*

Fig. 72a.

l'un des deux courants se dirige vers le sommet, alors que l'autre s'en éloigne, ils se repoussent et tendent à se mettre en croix.

89. **Courants sinueux.** — *Deux courants rectilignes égaux et*

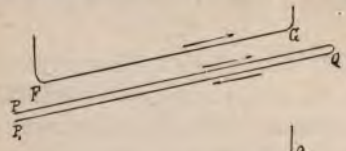


Fig. 73a.

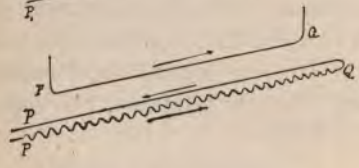


Fig. 73b.

dirigés en sens contraire, exercent évidemment sur le cadre une action nulle, ainsi que l'on peut s'en assurer en employant (fig. 73) deux conducteurs PQ et QP, aussi rapprochés l'un de l'autre que possible.

Si, au lieu de deux courants rectilignes, on fait usage

(fig. 73b) d'un système composé de deux conducteurs dont l'un PQ est droit et dont l'autre QP, est sinueux mais a les mêmes extrémités que le premier, on constatera également que l'action directrice est nulle. Nous pouvons donc conclure de là : *Qu'un courant sinueux produit la même action qu'un courant rectiligne ayant les mêmes extrémités.*

90. **Solénoïde.** — Nous avons vu que le champ magnétique, produit par un conducteur fermé, est le même que celui qui serait produit par un aimant dont le moment magnétique serait égal à l'aire du courant, multipliée par son intensité (86). Si nous considérons un conducteur enroulé en hélice (fig. 74), chacune des spires peut être assimilée, au point de vue de l'action extérieure, à un

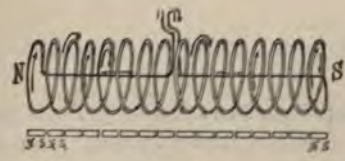


Fig. 74.

aimant dont les dimensions seraient déterminées par la propriété que nous venons de rappeler (86). Le conducteur héliçoïdal pourrait donc être remplacé par une suite d'aimants égaux, NS ; N_1 S_1 ; ..... N_{10} S_{10}, tous les pôles intermédiaires s'annulent et par conséquent notre conducteur agira comme un aimant doit NS_{10}.

On donne le nom de *solénoïde* à un conducteur enroulé en hélice, comme l'indique la figure 74. dont la longueur NS est grande par rapport au diamètre.

Un solénoïde, librement suspendu, subit l'action de la

terre, comme un barreau aimanté ; il subit l'action directrice d'un aimant ou d'un autre solinoïde (fig. 75), en un

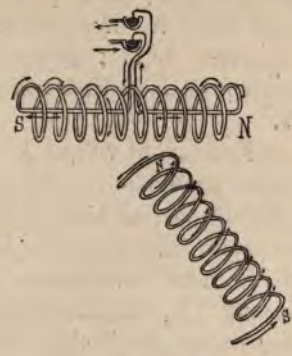


Fig. 75.

mot il se comporte absolument comme un barreau aimanté.

91. **Champ magnétique d'un solénoïde.** — Prenons (fig. 76) un solénoïde de diamètre assez grand, pour faciliter nos expériences, et nous allons étudier son champ magnétique par la méthode dont nous avons fait usage à différentes reprises. Soient AB les extrémités du solénoïde ; suivant l'axe, plaçons horizontalement, un carton sur lequel nous pourrons projeter de la limaille de fer, ou bien placer de petites aiguilles aimantées posées sur pivot.

Le courant parcourant le conducteur dans le sens des flèches, le pôle N du solénoïde est dirigé vers l'avant ainsi que l'on peut s'en assurer en approchant une aiguille aimantée. D'où la règle suivante :

Si nous regardons un solénoïde dans la direction de son axe, son pôle N sera dirigé vers nous, si le courant par-

court le conducteur dans le sens opposé à celui du mouvement des aiguilles d'une montre, et vice-versa.

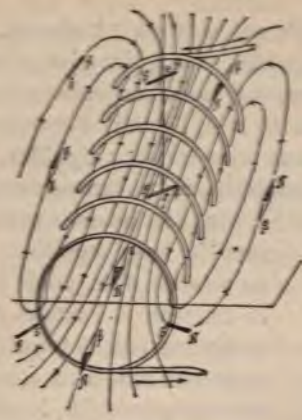


Fig. 76.

Les lignes de force, dessinées par la limaille de fer, sont continues; à l'intérieur, elles forment un faisceau parallèle, qui s'épanouit et se divise vers les extrémités pour entourer complètement le solénoïde.

La direction dans laquelle agissent les lignes de force est très nettement indiquée par l'expérience suivante : Plaçons quatre aiguilles aimantées, *a*, *b*, *c*, *d*, posées sur pivot; avant de faire passer le courant dans le solénoïde, elles seront toutes parallèles et dirigées de la même façon; mais aussitôt que le courant sera fermé à travers le conducteur, elles s'orienteront comme l'indique la figure, *b* et *c* auront leurs pôles tournés en sens inverse, et *d* sera perpendiculaire à la direction des deux premières. La direction du champ magnétique n'est donc

pas la même à l'intérieur qu'à l'extérieur du solénoïde, ce qui devait être pour que les lignes de force soient continues.

Il résulte de là que si nous réunissons, par une tige rigide, deux aiguilles, *e* et *f*, dont les pôles sont dirigés en sens contraire, et si nous suspendons le système ainsi formé par un fil de soie, l'action directrice du solénoïde sera de même sens pour les deux aiguilles.

92. **Action d'un solénoïde sur un barreau aimanté.** — Soit un barreau aimanté SN (fig. 77), ayant son pôle N tourné vers le bas, équilibrons ce barreau au moyen d'un poids P. Soumettons ce barreau à l'action d'un solénoïde ayant son pôle S tourné vers le haut; quand on envoie un courant au travers du conducteur CD, le pôle N de AB est attiré, il pénètre à l'intérieur du solénoïde; le pôle S de celui-ci attire le pôle N de l'aimant. Quand celui-ci arrive dans la position S_1 N_1, l'aimant est aspiré à l'intérieur du solénoïde, le pôle S_1 est repoussé par le pôle S de CD, mais l'attraction qui sollicite N_1 est plus grande que cette répulsion. Enfin quand l'aimant arrive en S_2 N_2, position dans laquelle le centre de l'aimant coïncide avec le centre du solénoïde, il y a équilibre entre toutes les forces magnétiques, et l'aimant flotte, si nous pouvons nous exprimer ainsi, dans le champ magnétique.

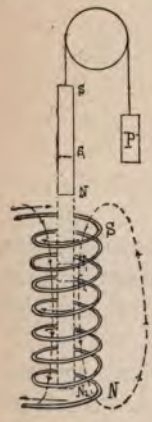


Fig. 77.

93. **Comparaison d'un solénoïde et d'un aimant creux.** — Procédons à la même expérience que tout à l'heure en faisant

usage d'un aimant creux (fig. 78). Dès que AB est arrivé en S^1 N^1, il est repoussé vers le haut et cela dès qu'il a pénétré à une très faible profondeur. Ces expériences montrent qu'un solénoïde ne peut donc pas être assimilé à un aimant creux; mais que ce dernier doit être assimilé à la réunion d'une série de solénoïdes disposés en cercle autour de l'axe.

Si nous examinons (fig. 79, *a*, *b*) la direction des lignes de force, dans le cas du solénoïde simple (fig. 79, *a*) et de la réunion de solinoïde S (fig. 79, *b*) nous verrons que la direction des lignes de force à l'intérieur du cylindre NS, dans le second cas, est de sens contraire à ce qu'elle est dans le premier cas.

Il en résulte que si l'on place un cylindre de fer doux à l'intérieur d'un solénoïde (79, *a*) il sera aimanté par influence, de façon que ces pôles soient disposés comme ceux du solénoïde, tandis que si l'on met le même fer dans un aimant creux (fig. 79, *b*) il sera également

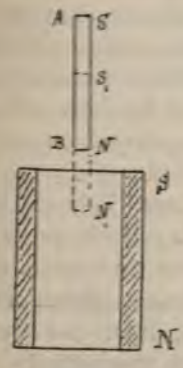


Fig. 78.

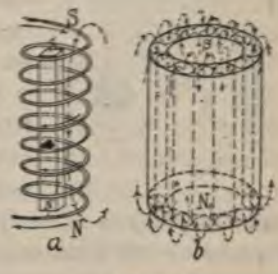


Fig. 79.

aimanté par influence, mais de façon que le pôle S soit voisin du pôle N de l'aimant. Il sera donc disposé en sens inverse.

94. **Action d'un solénoïde sur un morceau de fer doux.** — Reprenons l'expérience décrite au § 92, mais en substituant un barreau de fer doux à l'aimant; le fer doux sera aimanté par influence de la même façon que l'était le barreau, de sorte que les actions qui s'exercent sur lui sont de même sens que celles qui s'exercent sur l'aimant.

95. **Electro-aimant.** — Un solénoïde à l'intérieur duquel on place un cylindre de fer doux, constitue un électro-aimant. L'effet de l'introduction du fer doux, est de concentrer les lignes de force du champ magnétique dans le voisinage des pôles et de rétrécir le champ magnétique tout en le rendant plus intense. On met à profit la grande perméabilité du fer pour les lignes de force magnétiques (64). Lorsque l'on veut obtenir un champ très puissant sur un petit espace, et ainsi produire un grand effort d'attraction sur une pièce de fer doux AB, on emploie un électro-aimant en fer à cheval (fig. 80).

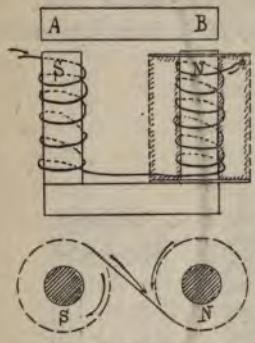


Fig. 80.

Nous avons indiqué plus haut (94), la relation qui existe entre le sens du courant et la polarité du fer doux. Pour obtenir des pôles de noms contraires, il faut que le courant parcoure en sens contraire les conducteurs qui entourent chacune des branches du fer à cheval. Le fil

est enroulé de gauche à droite sur l'une des bobines (bobine *dextrorsum*), et de droite à gauche sur l'autre (*sinistrorsum*).

Les cylindres en fer doux qui sont à l'intérieur des bobines s'appellent *les noyaux*, la pièce qui les réunit est la *culasse* et le morceau de fer doux AB sur lequel s'exerce l'attraction est *l'armature*.

Lorsque le fer est bien doux et ne possède pas de force coercitive, l'attraction sur l'armature cesse aussitôt que le courant est interrompu. Si le fer n'est pas bien doux les différentes pièces restent plus ou moins aimantées, elles conservent une certaine aimantation que l'on nomme le *magnétisme rémanent*.

96. **Effet du fer doux sur l'intensité du champ magnétique.** — Nous allons mesurer, en un point déterminé placé suivant l'axe d'un solénoïde, l'intensité du champ magnétique produit d'abord avec le solénoïde seul, ensuite avec celui-ci, dans lequel nous aurons introduit un barreau de fer doux, et cela pour différentes intensités de courant. Pour cela, plaçons au point 0 considéré une aiguille aimantée; tant qu'il n'y a pas de courant, elle restera dans la direction du méridien magnétique, elle n'est alors soumise qu'à l'action directrice de la terre, dont je représente la grandeur par OF. Sous l'influence du champ de AB, elle sera soumise à deux moments de rotation, l'un provenant de l'action de la terre, l'autre du solénoïde, soit *o*F' la grandeur de la force agissant sur chacun des pôles et provenant de cette dernière cause. Nous supposerons *o* placé assez loin pour que l'on puissé considérer l'attraction sur l'un des pôles comme égale à la répulsion qui s'exerce sur l'autre. L'aiguille se déplacera d'un certain angle jusqu'à ce qu'elle soit dans la

direction de la résultante de F et F'. Si l'action du solénoïde devient double, l'aiguille se déplacera d'un angle α' tel que $\text{tg}\alpha' = 2\ \text{tg}\alpha$.

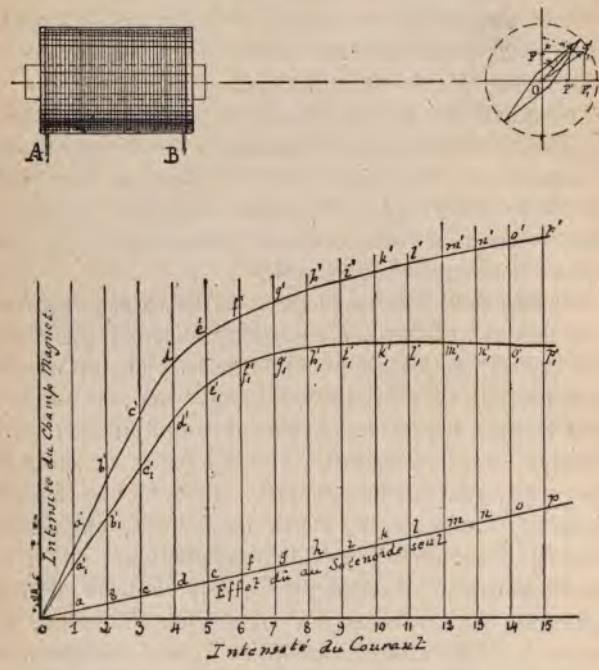


Fig. 81.

La variation de la tangente de l'angle de déviation de l'aiguille indiquera donc les changements dans l'intensité du champ.

Nous porterons sur une horizontale, à partir de *o*, les longueurs qui représentent les intensités de courant, et

verticalement en $1a$, $2b$, $3c$ des grandeurs proportionnelles à l'intensité du champ. Voici quels sont les résultats que nous obtiendrons.

1° *Avec le solénoïde seul. — L'intensité du champ est proportionnelle à l'intensité du courant.* Si pour une intensité de courant que nous représentons par 01, nous avons un champ magnétique dont l'intensité est figurée par la longueur $1a$, pour un courant d'intensité double 02, celle du champ magnétique sera $2b$, $2b = 2$ fois $1a$.

Pour un courant $08 = 8$ fois 01, $8h = 8$ fois $1a$; et ainsi de suite jusqu'au moment où le fil pourra supporter le courant.

2° *Avec l'électro-aimant.* — Dans ce cas l'intensité du champ magnétique augmente beaucoup plus vite que dans le cas précédent, jusqu'à un certain point, où l'augmentation devient beaucoup moins sensible. La courbe $o\ a'\ b'\ c' \ldots h'$ montre la loi de la variation de l'intensité du champ magnétique avec l'intensité du courant.

Si des longueurs $1a'$, $2b'$ $3c'$ etc., nous retranchons $a'\ a'_1$; $b'\ b'_1$; $c'\ c'_1$, etc... égales à $1a$, $2b$... les grandeurs $1a'_1$; $2b'_1$; $3c'_1$, etc... représentent le magnétisme du fer doux. Nous voyons que le magnétisme augmente de o jusqu'à c'_1, puis qu'il reste constant quelle que soit l'intensité du courant. C'est que le fer a concentré toutes les lignes de force dont il est susceptible, il est arrivé à l'état de saturation magnétique.

3° *Influence du rapport existant entre le diamètre du fil et l'intensité du courant.* — Au moyen du même dispositif, nous pouvons constater expérimentalement que, pour un même noyau de fer doux, l'intensité du champ produit reste la même, lorsque le produit de l'intensité

du courant, par le nombre de tours que fait le fil autour du solénoïde, reste le même.

Ainsi, si nous remplaçons le fil par un autre ayant un diamètre égal à la moitié de celui du précédent et ayant par conséquent le 1/4 en section, nous pourrons faire une bobine présentant les mêmes dimensions extérieures avec quatre fois plus de tours de fil. On reproduira les mêmes intensités de champ magnétique qu'avec la bobine primitive, en la faisant traverser par un courant d'une intensité quatre fois moindre.

L'intensité du champ magnétique, produite dans les conditions que nous avons indiquées, reste la même lorsque le produit de l'intensité du courant, par le nombre de tours que fait le conducteur sur la bobine, reste constant.

97. **Perméabilité magnétique de différents métaux.** — Si l'on répète la même expérience en remplaçant le fer doux,

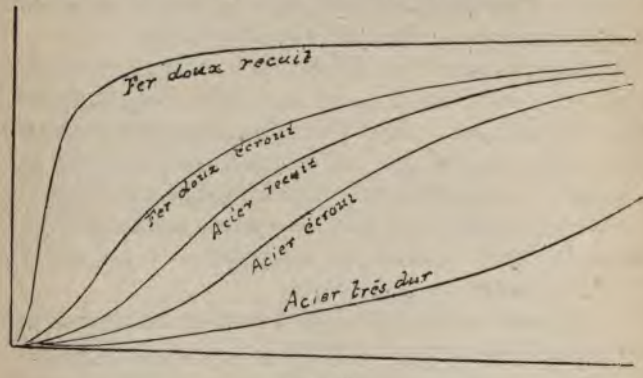


Fig. 82.

par du fer écroui, de l'acier recuit et de l'acier dur, on obtient des diagrammes de formes très différentes, qui

représentent pour chacun des métaux leur perméabilité magnétique. Ainsi, avec un courant d'une intensité 2, le fer doux recuit donne le même champ magnétique que le fer écroui avec une intensité 10, que l'acier recuit avec une intensité 14.5, que l'acier écroui avec 22, et l'acier trempé dur avec 44.

Ceci montre que dans la construction des électro-aimants on ne saurait apporter trop de soins au choix du fer employé pour la construction des noyaux, car le fer doux donne une intensité beaucoup plus grande avec moins de travail dépensé et, en outre, il conserve moins de magnétisme rémanent.

98. — Lorsque l'on place un barreau d'acier à l'intérieur d'un solénoïde, ce barreau s'aimante par le passage du courant, et il conserve son magnétisme même lorsque celui-ci est interrompu. Le sens de l'aimentation, ainsi que nous l'avons vu, dépend du sens du courant et de celui de l'enroulement, ainsi que l'on peut le montrer facilement par l'expérience suivante :

On place (fig. 83 (*a*)), une aiguille à tricoter dans un tube de verre autour duquel on enroule un conducteur,

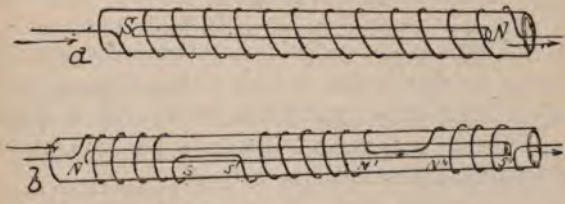


Fig. 83a et 83b.

on obtiendra ainsi un aimant présentant deux pôles uniques. Mais si l'on change plusieurs fois le sens de l'en-

roulement (fig. 83 (*b*)), on obtiendra des pôles intermédiaires en tous les points où l'enroulement du fil change de sens. On peut s'en assurer en produisant le fantôme magnétique de l'aiguille, ou bien en promenant dans son voisinage un petit aimant librement suspendu. Les pôles intermédiaires portent le nom de *pôles conséquents*.

99. **Fabrication des aimants artificiels.** — Pour fabriquer les aimants artificiels, on met les barreaux à aimanter en contact avec les pôles d'un électro-aimant très puissant (fig. 84), et pendant que ce dernier est excité par le cou-

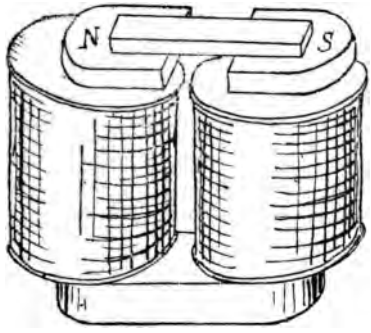


Fig. 85.

rant, on soumet le barreau à aimanter à des vibrations continues au moyen d'un maillet en bois (68), on facilite ainsi l'orientation des molécules. Il faut avoir soin de ne plus soumettre le barreau à des chocs dès qu'il est soustrait à l'influence de l'électro-aimant.

L'aimentation se produit beaucoup plus rapidement et plus efficacement par ce moyen que par les anciens procédés, qui consistaient à frotter le barreau à aimanter avec des aimants artificiels.

100. **Galvanoscopes et galvanomètres.** — L'action directrice du courant sur l'aiguille aimantée (84), action dont la découverte est due à Oerstedt, est employée pour déceler le passage du courant électrique et pour mesurer son intensité. Les appareils employés à cet effet portent le nom de *galvanoscopes* et de *galvanomètres*, suivant qu'ils accusent simplement le passage du courant ou qu'ils permettent de mesurer son intensité.

Ils se composent d'une aiguille aimantée NS (fig. 85) autour de laquelle on enroule un conducteur *ab* traversé

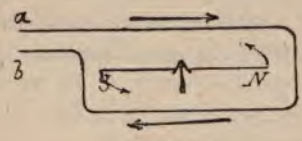


Fig. 85.

par le courant; d'après ce que nous avons vu plus haut, le sens de la déviation de l'aiguille nous indiquera celui du courant. Il est évident que si l'on multiplie le nombre de tours du courant autour de l'aiguille, le champ magnétique produit sera plus intense et l'action directrice sur cette dernière beaucoup plus grande. Les bobines ainsi formées s'appellent *cadres galvanométriques* ou *multiplicateurs*.

Lorsque l'on veut mesurer des courants trop faibles pour produire un champ magnétique suffisamment intense pour faire dévier d'une manière sensible une aiguille aimantée soumise à l'action de la terre, on remplace l'aiguille simple par un système astatique (fig. 86), ainsi que nous l'avons vu (91), le cadre galvanométrique agit sur les deux aiguilles de façon que toutes deux ten-

dent à dévier dans le même sens. Pour un courant d'une même intensité on obtiendra donc une déviation beaucoup plus considérable.

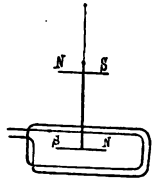


Fig. 86.

Les galvanomètres sensibles devront donc être construits en employant des aiguilles astatiques et des cadres galvanométriques présentant un grand nombre de tours de fil; on ne peut pas cependant augmenter ainsi indéfiniment la sensibilité, car plus le fil du multiplicateur est long, plus il est résistant et par conséquent plus grande est la diminution du courant à mesurer qui en résulte.

CHAPITRE X

UNITÉS PRATIQUES EMPLOYÉES EN ÉLECTRICITÉ

101. — Pour pouvoir mesurer, c'est-à-dire exprimer par des nombres les grandeurs relatives des quantités physiques de même espèce, on a choisi pour chacune des espèces de grandeurs, une grandeur type à laquelle on compare toutes les autres et que l'on appelle *unité*.

Ainsi pour les longueurs, on a pris le mètre, pour les volumes le litre ou décimètre cube, pour la pression dans notre pays, on prend la pression atmosphérique normale; en France et en Allemagne on a adopté comme unité la pression exercée par un poids de 1 kilogramme sur une surface de 1 centimètre carré; en Angleterre, une pression égale à celle exercée par un poids d'une livre sur un pouce carré.

Autrefois on faisait usage dans notre pays, et l'on emploie encore, notamment en Angleterre, en Amérique, en Russie, en Suède, en Norwège, etc., des systèmes de mesures dans lesquels il n'existe aucune relation entre les unités de longueur, de surface, de volume, de poids, etc. On a adopté pour chacune de ces grandeurs physiques une unité absolument arbitraire. Si nous prenons, par exemple, le système employé en Angleterre et en Amérique, nous voyons qu'il n'existe aucune relation simple entre la livre, unité de poids, le pied cube, unité de volume et le gallon unité de capacité. Si l'on veut avoir par exemple le poids en livres d'un certain nombre de gallons d'eau il faut se livrer à un long calcul.

102. **Système d'unités arbitraires. — Système absolu.** — Un système de poids et mesures tel que celui usité en Angleterre est ce que l'on appelle un *système arbitraire*.

Dans le système de poids et mesures dont nous faisons usage, au contraire, il existe des relations simples entre les unités de longueur, de surface, de volume et de poids, c'est ce que l'on appelle un *système absolu*. On aurait peut-être mieux fait de dire un *système rationnel*, car il n'y a rien d'absolu dans l'unité fondamentale qui est le mètre.

Les créateurs du système métrique français ont voulu prendre pour base une fraction décimale d'une longueur invariable existant dans la nature, et ils ont choisi comme unité de longueur la 1/10,000,000 partie du quart du méridien terrestre passant par Paris. La mesure de l'arc du méridien a été faite en 1799 par Delambre et Méchin, mais des travaux ultérieurs de Bessel ont montré que la mesure faite n'était pas d'une exactitude rigoureuse.

Au point de vue pratique l'erreur constatée n'a aucune importance, et l'on aurait tout aussi bien pu choisir comme unité une longueur arbitraire quelconque que l'on aurait pu toujours reproduire avec exactitude. C'est en fait ce qui existe aujourd'hui, car l'unité de longueur à laquelle nous nous rapportons n'est pas la fraction décimale du méridien indiquée plus haut, mais une grandeur définie comme suit :

C'est la distance qui existe à 0° entre deux traits tracés sur une barre de platine conservée dans les caves de l'observatoire de Paris.

Les multiples des unités s'expriment par les préfixes grecs.

Deca, 10; hecto, 100 ; kilog., 1000 ; myria, 10,000; et mega, 1,000,000.

Les sous-multiples par les préfixes latins. Micro, 0.000,001; milli, 0.001; centi, 0.01; deci, 0.1.

98. — Le congrès des électriciens qui s'est réuni à Paris en 1881, a établi un système d'unités absolues pour la mesure des grandeurs électriques.

Si nous nous reportons aux définitions que nous avons données des diverses grandeurs électriques et magnétiques, quantité, capacité, intensité du courant, nous verrons que l'appréciation de ces grandeurs électriques ou magnétiques se base sur leur comparaison à des grandeurs mécaniques, longueur, force temps. Nous devons donc commencer par établir les *unités fondamentales* d'où les autres seront déduites en se basant sur les lois qui régissent les phénomènes mécaniques et électriques. *Ces dernières portent le nom d'unités dérivées.*

103. **Unité de longueur et dérivées.** — On a choisi comme unité de longueur le *centimètre* d'où l'on a fait dériver l'unité de *surface* qui est le centimètre carré, l'unité de volume le *centimètre cube.*

L'*unité de masse* dérive de l'unité de volume; on a choisi comme unité de masse, la masse de 1 centimètre cube d'eau distillée prise à la température de 4° centigr. Cette unité de masse, à Paris, est égale à la masse du gramme.

104. — Si aux unités de longueur et de masse, nous ajoutons l'unité de *temps* qui est la seconde, nous avons les trois unités fondamentales du système absolu d'unités mécaniques et électriques.

Le système adopté par le Congrès des électriciens de Paris, porte à cause de cela le nom de *système C. G. S.* (centimètre, gramme, seconde).

105. **Unités mécaniques.** — Les grandeurs mécaniques que nous aurons à apprécier sont : la *vitesse*, l'*accé-*

lération, la *force*, le *travail*, l'*énergie*, la *puissance*.

106. **Unité de vitesse.** — Si un corps pesant se meut dans l'espace, il suit un certain chemin ou trajectoire, prenons sur cette trajectoire deux points très rapprochés l'un de l'autre, si nous déterminons le temps que le corps considéré mettra pour passer d'un point à l'autre, *la longueur du chemin parcouru, exprimée en centimètres, divisée par le temps employé à le parcourir, exprimé en secondes, nous donnera la valeur numérique de la vitesse moyenne* pendant l'intervalle parcouru. La vitesse d'un corps est le rapport entre la longueur du chemin parcouru et le temps employé à le parcourir. Vitesse $= \frac{\text{Chemin parcouru}}{\text{Temps}}$.

On a pris comme UNITÉ DE VITESSE *celle qui correspond à un déplacement de* 1 *centimètre pendant une seconde*.

La vitesse est *uniforme* lorsque le déplacement est le même pendant chaque unité de temps.

107. **Unité d'accélération.** — Si les longueurs des chemins parcourus pendant deux secondes consécutives ne sont pas les mêmes, le rapport qui donne la vitesse pendant chaque seconde change, *la vitesse est variable*. Nous avons alors à considérer non seulement de combien le mobile s'est déplacé pendant l'unité de temps, mais nous avons également à voir de combien la vitesse a changé pendant la même période.

La quantité dont la vitesse varie pendant l'unité de temps s'appelle l'*accélération*, et l'on prend comme *unité d'accélération*, *celle qui correspond à une augmentation de* 1 *centimètre pendant* 1 *seconde*.

Exemple. — Lorsqu'un corps tombe sous l'action de la pesanteur, sa vitesse augmente continuellement et la quantité dont elle s'accroît est de 981 centimètres par

seconde, de sorte que si vous abandonnez un corps à lui-même, au bout de 1″ sa vitesse est de 981 centimètres; au bout de la 2e seconde 981 + 981 = 1962 centimètres; au bout de la 3e seconde 1962 + 981 = 2943 cent., etc., au bout de la 10e seconde de 9810 centimètres.

La vitesse est la quantité dont se déplace un corps relativement au temps. L'accélération est la variation de la vitesse prise également par rapport au temps.

108. **Unité de force.** — Rappelons que la propriété fondamentale de la matière est l'*inertie*, qui fait qu'un corps ne peut apporter de lui-même aucun changement à son état de repos ou de mouvement. Pour qu'il y ait modification dans cet état, il faut l'intervention d'un nouvel élément, la *force*.

On sait par expérience qu'une même force imprime des accélérations très différentes à des corps du même volume, mais de diverses substances; il est cependant toujours possible de trouver toutes les substances, des volumes tels qu'une même force leur communique une même accélération, ces diverses quantités de matières ont alors des *masses égales*, et si l'on suppose chacune de ces masses subdivisées en parties ayant chacune une masse égale à celle d'un centimètre cube d'eau distillée, le nombre des parties ainsi obtenues représentera numériquement la masse du corps.

Une force peut être définie par l'accélération qu'elle communique à l'unité de masse, c'est-à-dire par le changement de vitesse qu'elle lui imprime après avoir agi sur elle pendant 1 seconde.

On a choisi comme *unité de force, la force qui après avoir agi sur la masse de 1 gramme pendant 1″, lui a*

communiqué une accélération de 1 centimètre. Cette unité porte le nom de DYNE.

Une dyne en agissant sur un gramme augmente donc sa vitesse de 1 centimètre par seconde. Si cette force agissait en sens contraire du mouvement du corps, elle diminuerait la vitesse de 1 centimètre par seconde.

Exemples. — 1. Combien faut-il de dynes pour contrebalancer l'effet de la pesanteur sur un gramme de matière?

Nous savons par expérience que la pesanteur agissant sur une masse de 1 gramme lui donne une accélération de 981 centimètres par seconde, pour contrebalancer cet effet, il faudrait donc appliquer en sens inverse de la pesanteur une force de 981 dynes.

2. A combien de dynes correspond la force qu'exerce la pesanteur sur 1 kilogramme ?

Puisque 1 gramme équivaut à 981 dynes, 1 kilogramme équivaut à 981000 dynes.

3. Quelle force en dynes faut-il pour soulever la masse d'un gramme au pôle, à Paris, à l'équateur?

983,11 — 980,94 — 978,10 dynes.

4. Exprimer en dynes la pression barométrique au niveau de la mer, cette pression étant de 760 millim. de mercure.

Le poids d'une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur et de 1 centimètre carré de section est de 1033 masses-grammes, soit

$$1033 \times 981 = 1013000 \text{ dynes.}$$

109. **Unité de travail.** — Quand un corps est déplacé dans un sens opposé à celui dans lequel le feraient mouvoir les forces qui le sollicitent, si celles-ci agissaient librement, il y a travail accompli, et ce travail est mesuré

par *le produit de la grandeur du déplacement et de l'effort qui a été fait pour déterminer ce déplacement*. Ainsi, par exemple, si nous soulevons un poids, nous devons faire un effort en opposition de la pesanteur, nous accomplissons un travail.

Il y a deux éléments qu'il importe de ne pas confondre, c'est l'*énergie* et le *travail*. L'énergie est l'aptitude à faire du travail, chaque fois qu'il y a un travail effectué on a dû dépenser une certaine quantité d'énergie.

Dans le système C. G. S., on prend comme *unité de travail, le travail accompli pour déplacer de 1 centimètre le point d'application d'une force de 1 dyne dans le sens opposé à la direction de cette force. Cette unité s'appelle* ERG.

Nous avons vu que la pesanteur agissant sur la masse de 1 gramme correspond à une force de 981 dynes, il s'en suit que quand on a soulevé un gramme à 1 centimètre de hauteur on a accompli un travail de 981 ergs et dépensé une quantité d'énergie équivalente.

L'énergie ou l'aptitude de faire du travail se présente sous des formes diverses, par exemple, mécanique dans un poids suspendu, calorifique dans un corps chauffé, électrique dans un conducteur parcouru par un courant ; ces diverses sortes d'énergies peuvent se transformer les unes dans les autres ; ainsi l'on sait par les expériences de Joule, que pour élever de 1° centigrade la température de 1 gramme d'eau, il faut dépenser une quantité d'énergie correspondant à 42000000 d'ergs. C'est ce que l'on appelle l'*équivalent mécanique de la chaleur*.

Problème. — Si 981 dynes déplacent un corps de 4 centimètres, quel est le travail accompli ?

$$981 \times 4 = 3924 \text{ ergs.}$$

110. **Travail. Puissance.** — Dans l'évaluation du travail, comme nous l'avons vu, le temps n'intervient pas, ainsi lorsque l'on soulève un poids de 100 kilogrammes à 10 mètres de hauteur, on accomplit un travail de 1000 kilogrammètres, que l'on ait employé pour arriver à ce but 1 seconde ou 1 heure.

La puissance est la quantité de travail qui peut être fournie pendant l'unité de temps. Un moteur qui aurait une puissance égale à l'unité, serait celui qui pourrait développer un *erg par seconde*.

Le kilogrammètre est l'unité de travail généralement employée en mécanique, tandis que l'unité de puissance dont on fait usage pour évaluer les moteurs animés ou inanimés, chutes d'eau, machines à vapeur, etc., est le *cheval vapeur*. On dit qu'un moteur a un cheval vapeur de puissance lorsqu'il peut développer 75 kilogrammètres par seconde. Le cheval vapeur est une unité absolument arbitraire, sa valeur diffère notablement en Angleterre, en Amérique, en France, en Belgique et en Allemagne.

Aussi les électriciens ont ils adopté une unité pratique de travail qui se relie directement au système d'unités absolues. Cette unité est le *Joule*, qui vaut 10000000 d'ergs.

L'unité pratique de puissance est alors le *Watt* (1).

Comme l'action de la pesanteur, agissant sur 1 kilo-

(1) Certains auteurs employaient quelque fois le Watt comme unité de travail, la puissance s'exprimait alors en Watts par seconde. Afin d'éviter toute équivoque à ce sujet, le congrès des électriciens réuni à Paris en tout 1889, a décidé d'adopter le nom de Joule pour l'unité de travail et le Watt pour la puissance.

Le même congrès a émis le vœu de voir exprimer dans la pratique industrielle, la puissance des machines en kilog Watts au lieu de l'exprimer en chevaux-vapeur.

gramme, correspond à une force de 981000 dynes, 1 kilogrammètre équivaut à 981000000 ergs ou 9,81 Watts et 75 kilogrammètres ou un cheval vapeur à 7357500000 ergs par seconde ou 735,75 Watts ou en chiffres ronds 736 Watts.

En Angleterre, on évalue l'énergie électrique fournie sous forme de courant, par exemple pour l'éclairage électrique, au moyen de l'*Unité commerciale du Board of Trade*. Cette unité vaut 1000 Voltampères-heure ou 1000 Watts-heure.

111. **Unités magnétiques et électriques.** — Nous avons défini (13) l'unité de quantité d'électricité en nous basant sur les actions réciproques de deux charges statiques d'électricité; nous pourrions faire dériver de là toutes les autres unités électriques et magnétiques, nous aurions ainsi le système *électrostatique d'unités*.

On peut faire dériver également le système d'unités en partant de l'attraction ou de la répulsion qu'exercent l'un sur l'autre deux courants de même sens ou de sens contraire, c'est le système électrodynamique; enfin, on peut partir de l'action exercée par les courants sur les aimants, et l'on arrive au système appelé *électromagnétique*.

C'est ce dernier qui est le seul employé dans la pratique, ce sera par conséquent celui-là que nous exposerons.

112. **Unité de pôle.** — Au chapitre du magnétisme (61), nous avons défini l'unité d'intensité de pôle de la façon suivante : c'est celle d'un pôle d'aimant qui, placé à une distance égale à l'unité d'un autre pôle de même intensité, l'attire ou le repousse avec une force égale à l'unité de force.

Or, nous avons déjà comme unités fondamentales de

longueur et de force, le centimètre et la dyne. *L'unité d'intensité de pôle,* est donc *l'intensité d'un pôle qui mis en présence d'un pôle identique et situé à une distance de 1 centimètre, l'attire ou le repousse avec une force de une dyne.* Cette unité ne porte pas de nom spécial.

Si un pôle d'une intensité égale à l'unité est placé dans un champ magnétique, il est soumis à une force que l'on peut mesurer, *si cette force est égale à une dyne, l'intensité du champ magnétique au point considéré est égale à l'unité.*

Cette unité d'intensité de champ magnétique est extrêmement petite ; le professeur S.-P. Thompson a proposé d'adopter pour les besoins de la pratique une unité beaucoup plus grande valant 100 millions de fois l'unité absolue C. G, S., telle qu'elle a été définie plus haut, et il propose de lui donner le nom de Gauss.

Un champ magnétique ayant 1 gauss d'intensité serait donc celui dans lequel l'unité de pôle serait soumise à une force de 100,000,000 de dynes, soit $\frac{100,000,000}{981} = 101$ kilog. 937.

113. **Unité d'intensité du courant.** — L'unité d'intensité

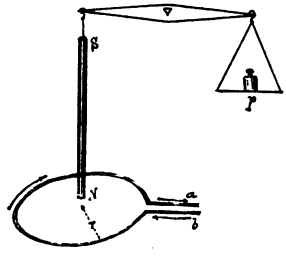


Fig. 87.

dérive de la façon suivante des unités fondamentales. Nous avons vu qu'un courant circulaire fermé exerce une action magnétique sur un pôle d'aimant; prenons un conducteur *a b*, dont le rayon $r = 1$ centimètre (fig. 87), faisons circuler le courant dans un sens tel, que le pôle Nord d'un aimant long et mince suspendu perpendiculairement à son plan, comme l'indique la figure, soit attiré. Choisissons le barreau de façon que ses pôles aient une intensité égale à l'unité; l'attraction exercée par le courant peut être mesurée par le poids p qui lui fait équilibre. Si nous faisons varier l'intensité du courant qui parcourt *a b*, nous trouverons que l'attraction exercée sur le pôle N est proportionnelle à l'intensité du courant.

La longueur du courant agissant sur le pôle N est égale à $2\pi r = 6{,}2832$ cent., car $r = 1$; chaque centimètre de longueur du conducteur exerce sur le pôle N une attraction égale à $\frac{p}{6{,}2832}$ dynes, ou $\frac{p}{2\pi}$ dynes. On a choisi comme *unité absolue d'intensité de courant celle pour laquelle l'attraction exercée par chaque centimètre de longueur du courant, sur l'unité de pôle, placée à l'unité de distance est égale à une dyne, tous les points du courant étant distants du pôle de 1 centimètre.*

L'attraction totale exercée par le courant *a*, *b*, sur le pôle N placé à l'unité de distance est donc $p = 2\pi$ dynes $= 6{,}2832$ dynes.

Pour les besoins de l'industrie, on a été amené à prendre une unité d'intensité 10 fois plus petite que l'unité absolue; cette *unité pratique a été appelée* Ampère.

Les courants employés pour l'éclairage, la galvanoplastie, etc., s'estiment en Ampères. Les courants télé-

graphiques en milliampères ou millièmes d'ampères. On exprime quelquefois en micro-ampères, ou millionièmes d'ampères les intensités extrêmement faibles.

114. **Unité de quantité.** — L'intensité d'un courant est la quantité d'électricité débitée par ce courant pendant l'unité de temps; un courant d'une intensité égale à l'unité, débitera une unité de quantité par seconde. L'unité de quantité dérive ainsi naturellement des unités d'intensité et de temps.

L'unité pratique de quantité est la quantité d'électricité débitée pendant une seconde par un courant de 1 ampère. Cette unité s'appelle Coulomb et est égale comme l'ampère à 0,1 de l'unité absolue C. G. S.

Si nous comparons ces unités à celles dont on fait usage en hydraulique, l'unité de quantité est le litre, un courant d'eau qui débiterait un litre par seconde aurait une intensité égale à l'unité. On n'a pas cru devoir donner un nom spécial à cette dernière unité.

115. **Unité de différence de potentiel ou de force électro-motrice.** — Nous avons maintenant à définir l'unité de hauteur de charge électrique, différence de potentiel, ou force électro-motrice.

Nous avons vu (22) que : *Si l'unité de quantité d'électricité en passant d'un corps à un autre dont le potentiel est moins élevé accomplit un travail égal à l'unité de travail, la différence de potentiel entre ces deux corps est égale à l'unité.*

Par exemple, un corps conducteur étant chargé d'électricité positive, si cette quantité d'électricité en passant à la terre peut accomplir un travail égal à un erg, le corps était au potentiel 1.

Seulement l'unité, ainsi définie, est beaucoup trop

petite pour les besoins ordinaires, et l'on en a pris une autre valant 100,000,000 de fois l'unité C. G. S. de différence de potentiel ou de forcé électro-motrice et on lui à donné le nom de VOLT.

Un conducteur chargé d'un coulomb d'électricité, à la tension de 1 volt, étant mis en communication avec la terre, la charge d'électricité en passant au réservoir commun, pourra accomplir un travail de 10,000,000 d'ergs.

Nous savons que 1 kilogrammètre équivaut à 98,100,000 ergs, par conséquent 1 coulomb d'électricité en passant du potentiel 1 au potentiel 0, accomplira un travail de 100 millions d'ergs ou $\frac{100,000,000}{98,100,000} = 0,102$ kilogrammètre.

Entre les deux pôles d'un élément de pile Daniell, il existe une différence de potentiel d'à peu près 1 volt, si les deux pôles d'un de ces éléments sont réunis par un conducteur tel que l'intensité du courant qui le parcourt soit de 1 ampère, la pile débitera 1 coulomb par seconde et donnera lieu dans ce conducteur à une dépense d'énergie correspondant à 0,102 kilogrammètre par seconde ou à 1 watt.

116. **Unité de résistance.** — La loi d'Ohm nous donne la relation suivante entre l'intensité, la force électro-motrice et la résistance du conducteur parcouru par le courant :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Force électro motrice.}}{\text{Résistance.}}$$

On prend comme *unité pratique de résistance celle d'un conducteur à travers lequel une pression ou force électro-motrice d'un volt détermine un courant d'un ampère.*

L'ampère valant 0.1 de l'unité absolue C. G. S. d'intensité, et le Volt valant 100,000,000 d'unités absolues C. G. S.

de force électro motrice, il en résulte que l'unité pratique de résistance est égale à $\frac{100,000,000}{0,1} = 1,000,000,000$ d'unités absolues C. G. S.

L'unité pratique de résistance s'appelle Ohm légal: elle est égale à la résistance qu'oppose au passage du courant une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de $1^{m}06$ *de longueur à la température de* 0°.

C'est cette unité qui a été définitivement adoptée par le Congrès des électriciens, pendant la session tenue à Paris en 1884.

On lui a donné le nom d'Ohm légal pour le distinguer de l'Ohm qui avait été déterminé par une commission de savants de l'Association britannique pour l'avancement des sciences, que l'on désigne sous le nom d'Ohm B. A. (British association), et dont la valeur est de 0,9889 Ohm légal (1).

Les étalons de l'association britannique avaient été construits au moyen de divers alliages, platine et argent, maillechort, etc.; mais tous ces alliages ont le défaut de se modifier à la longue. Pour éviter cet inconvénient, on a adopté le mercure pour la confection des étalons types; en outre comme les étalons sont géométriquement définis, on pourra toujours les reproduire.

Les étalons types sont formés d'un tube en verre droit (fig. 88), choisi de section aussi uniforme que possible,

(1) Il y a déjà longtemps que Siemens avait proposé d'adopter comme unité de résistance, la résistance d'une colonne de mercure de 1 mètre de long et de 1 millimètre carré de section. Cette unité a été pendant longtemps en usage en Allemagne, elle avait le défaut d'être arbitraire.

Les mesures faites en Ohms B. A. doivent être divisées par 1,0112 ou multipliées par 0,9889 pour être réduites en Ohms légaux.

Les mesures faites en unités Siemens (S. E. Siemens Einheit) doivent être divisées par 1.06 pour que leur valeur soit réduite en Ohms légaux.

les extrémités du tube sont meulées de façon à l'amener aussi exactement qu'il est possible à la longueur de

Fig. 88.

1 mètre 06, la section intérieure du tube est calibrée au moyen d'un globule de mercure d'après la méthode employée pour le calibrage des tubes de thermomètres. Les extrémités du tube aboutissent dans des flacons remplis de mercure où s'établissent les contacts au moyen de tiges en platine, les tiges en cuivre étant attaquées par le mercure.

Le modèle d'étalon ainsi composé est très incommode pour les usages ordinaires; aussi on en fait des copies d'après un type indiqué par M. Mascart.

Elles sont formées (fig. 89) d'un tube en verre replié plusieurs fois sur lui-même et dont les extrémités aboutissent également dans des évasements remplis de mercure. Le tout est placé dans un bocal où l'on peut mettre de la glace fondante ou bien un liquide chauffé.

Fig. 89.

Les résistances très grandes s'évaluent en megohms; le megohm valant 1,000,000 d'ohms.

117. **Exemples d'application des unités.** — Quelle est la force électro-motrice nécessaire pour faire circuler un courant

de 10 Ampères au travers d'une résistance de 5 Ohms.

La loi de Ohm nous donne :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Force électro motrice.}}{\text{Résistance.}}$$

$$10 = \frac{\text{Force électro motrice.}}{5}$$

d'où force électro-motrice = 50 Volts.

II. Une lampe à incandescence de 16 bougies est traversée par un courant de 0,6 d'Ampère, la différence de F. E. M. entre les bornes de la lampe est de 100 Volts, quelle est la résistance de la lampe?

$$0{,}6 = \frac{100}{R} \quad R = \frac{100}{0{,}6} = 166{,}7 \text{ Ohms.}$$

III. La résistance d'une ligne télégraphique est de 2,500 Ohms y compris les appareils, combien faudra-t-il employer d'éléments de pile ou poste de départ, sachant que ces éléments produisent chacun une f. e. m. de 1,5 Volts, et qu'il faut un courant de 10 milli-ampères pour faire fonctionner l'appareil au poste récepteur, on suppose que la ligne n'a pas de perte ?

$$\text{Intensité} = 0{,}010$$
$$\text{Résistance} = 2500$$

$$0{,}01 = \frac{R}{2500} \quad E = 2500 \times 0{,}01 = 25 \text{ Volts.}$$

Chaque élément ayant une f. e. m. de 1,5 Volt il faudra employer $\frac{25}{1.5} = 16{,}6$ soit 17 éléments.

IV. Application aux courants dérivés.

Entre deux points A et B, il existe une différence de potentiel de 90 Volts A*a*B a une résistance de 100 Ohms.

A*b*B a une résistance de 2 Ohms.

Quelles sont les intensités respectives des courants dans les deux branches?

1° Dans A*a*B. Intensité $= \frac{90}{100} = 0{,}9$ Ampère;

2° » A*b*B. » $= \frac{20}{2} = 45$ »

L'intensité totale obtenue est donc de 45,9 Ampères.

V. Quelle serait la résistance du conducteur unique par lequel on pourrait remplacer *a* et *b* (fig. 90), de façon à ne pas changer l'intensité totale du courant?

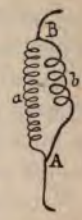


Fig. 90.

D'après les lois des courants dérivés (75) la résistance du conducteur unique devrait être $= \frac{ab}{a+b} = \frac{200}{102}$ Ohms.

Et l'intensité serait $I = \frac{90 \times 102}{200} = 45{,}9$ Ampères.

118. **Unité de capacité.** — Nous avons vu (26) que l'électricité se comporte comme un gaz compressible, la quantité d'électricité que peut emmagasiner un conducteur dépend du potentiel de ce conducteur et de sa capacité; comme la quantité de gaz que peut contenir un réservoir dépend de la pression et du volume du récipient.

Si nous prenons un condensateur dont l'une des armatures est mise en communication avec le sol, si nous mettons l'autre armature en communication avec une source constante capable d'élever le potentiel à 1 Volt au-dessus du potentiel de la terre, une certaine quantité d'électricité sera emmagasinée.

On a choisi comme unité pratique de capacité celle d'un condensateur qui emmagasine un Coulomb d'électricité pour

une différence de potentiel de 1 volt entre ses armatures. Cette unité a été appelée *Farad*, du nom de Faraday.

Cependant pour les besoins courants le Farad serait une capacité beaucoup trop considérable, la capacité de la sphère terrestre n'est que de 707 millionnièmes de Farad; aussi on exprime généralement les capacités des conducteurs en *microfarads*, c'est-à-dire en millionnièmes de Farads.

Applications. — I. Quelle charge pourrait-on communiquer à un câble sous-marin de 10 milles marins de longueur, au moyen d'une pile Daniell de 100 éléments? Sachant que le mille marin de câble a une capacité de 1/3 de microfarad, et que la f. e. m. de chaque élément Daniell est de 1 Volt?

Nous avons la relation : charge = capacité × différence de potentiel.

$$\text{Charge} = \frac{10}{3} \times 100 = 333{,}33 \text{ Coulombs.}$$

II. Quelle tension devrait-il exister entre les armatures d'un condensateur d'une capacité de 5 microfarads, pour que la charge emmagasinée soit de 25 Coulombs.

En employant la même relation que dans le cas précédent, nous avons :

$$25 = 5 \times \text{différence de potentiel.}$$

La différence de potentiel demandée est de 5 Volts.

119. **Applications de la loi de Joule. — Watt.** — Nous avons vu que Joule a établi expérimentalement que l'énergie dépensée par un courant dans un conducteur est donnée par la relation.

Énergie = (Intensité)^2 × Résistance × Temps..... (1).

Pendant l'unité de temps l'énergie dépensée = (Intensité)^2 × Résistance; et comme la loi d'Ohm nous donne

la relation Intensité $= \frac{\text{Force électro motrice}}{\text{Résistance}}$ . . . . (2).

On peut déduire des formules (1) et (2).

Énergie par 1″ = F. E. M × Intensité. . . . . (3).

Si donc nous considérons un conducteur AB, parcouru par un courant d'une intensité égale à l'unité absolue C. G. S. et si la résistance du conducteur est également égale à l'unité, la pression nécessaire pour faire circuler ce courant sera de 1 unité absolue de F. E. M. L'énergie dépensée par le courant dans ce conducteur pendant 1″ sera égale à 1 erg.

Prenons maintenant un conducteur d'1 Ohm de résistance parcouru par un courant de 1 Ampère, et par conséquent en vertu d'une force électro-motrice de 1 Volt.

Comme 1 ampère $= \frac{1}{10}$ unité absolue C. G. S. d'intensité.

Et 1 Volt = 100,000,000 d'unités absolues C. G. S. de force électro motrice.

L'énergie dépensée par le courant de 1 ampère circulant en vertu d'une force électro-motrice de 1 Volt sera $= 1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampère} = \frac{1}{10} \times 100{,}000{,}000$ soit 10,000,000 d'ergs où 1 *Watt* (110).

Par conséquent, le produit du nombre d'ampères qui parcourent un conducteur par la différence de potentiels exprimée en Volts, existant entre les extrémités de ce conducteur, donne en Watts l'énergie dépensée par le courant par seconde.

Si nous repassons de la formule (3) à la relation (1), nous voyons que le *produit du carré de l'intensité exprimée en ampères, par la résistance exprimée Ohms nous*

donne en Watts l'énergie dépensée par le courant en 1″.

Problèmes. — I. Un courant de 5 Ampères a circulé pendant 25 minutes à travers une résistance de 6 Ohms, combien des kilogrammètres ont-ils été dépensés?

$$\text{Énergie} = (\text{Intensité})^2 \times \text{Résistance} \times \text{temps}.$$

$$\text{Énergie} = 5^2 \times 6 \times 25 \times 60 = 225{,}000 \text{ Watts}.$$

$$\text{Énergie} = \frac{225000}{9.81} = 22926{,}6 \text{ kilogrammètres}.$$

II. Quelle est en chevaux-vapeur la puissance nécessaire pour faire fonctionner une lampe à arc exigeant un courant de 25 Ampères d'intensité avec une force électro-motrice de 50 Volts.

La puissance en Watts et de $25 \times 50 = 1250$.

Comme 1 cheval-vapeur vaut 736 Watts, la puissance demandée est de $\frac{1250}{736} = 1{,}7$ cheval-vapeur.

III. Quelle est la puissance absorbée par 100 lampes à incandescence de 16 bougies, sachant que chacune d'elles demande un courant de 0,6 d'Ampère et une tension de 100 Volts?

Réponse : $0{,}6 \times 100 \times 100 = 6000$ Watts $= 8{,}15$ chevaux vapeur.

120. **Application de la loi de Faraday à la mesure des courants.** — Un courant traversant un électrolyte met en liberté pendant l'unité de temps des quantités de composants qui sont proportionnelles à l'unité du courant.

Ainsi un courant de 1 Ampère (ou 3600 Coulombs par seconde), met en liberté par heure 4 gr. 025 d'argent ou 1 gr. 18 de cuivre. Il faut donc 894,41 Coulombs pour déposer un gramme d'argent et 3058,60 Coulombs pour déposer un gramme de cuivre.

L'équivalent électro-chimique est la quantité du composant qui est mise en liberté par 1″.

Problème. — I. Combien de grammes de cuivre un courant de 5 Ampères déposerait-il en 1/2 heure?

1 Ampère dépose 1 gr. 18 par heure, soit 0 gr. 59 en 1/2 heure, 5 Ampères déposeront 0,59 × 5 = 2 gr. 95 en 1/2 heure.

II. Quelle est l'intensité du courant qui déposerait 5 grammes de cuivre en 1/2 heure?

Réponse : $\frac{5}{0.59}$ = 8 Ampères 47.

121. **Récapitulation.**

Unités fondamentales :

Longueur. — *Centimètre.*

Masse. — *Gramme.*

Temps. — *Seconde.*

Unités dérivées mécaniques :

Surface. — *Centimètre carré.*

Volume. — *Centimètre cube.*

Vitesse. — $\frac{\textit{Espace parcouru}}{\textit{Temps}}$. — *Centimètre par seconde.*

Accélération. — *Accroissement de vitesse de 1 centimètre par 1″.*

Force. — *Dyne.*

Travail. — Force × Espace parcouru = *Erg.*

Unité pratique. *Joule* = 10000000 d'ergs.

Puissance. — *Joule par 1″ Watt.*

Unités dérivées électriques :

Unité de pôle. — N'a pas de nom spécial.

Intensité. — Unité pratique *Ampère* = $\frac{1}{10}$. Unité absolue C. G. S.

Force E. M. — Unité pratique *Volt* = 100000000, id.

Résistance. — $\frac{\text{Force électro-motrice}}{\text{Intensité.}}$. Unité pratique *Ohm* = 1000000000, id.

Quantité. — *Intensité* × *temps* = *Coulomb* = $\frac{1}{10}$ Unité, id.

Capacité. — Quantité × F. E. M. = *Farad.*

Unité usuelle, *Microforad* = $\frac{1}{1000000000000000}$ Unité C. G. S.

CHAPITRE XI

DES PILES. — PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

122. **Force électro-motrice due aux actions chimiques.** — Si dans un vase en verre contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique (fig. 91), nous plongeons deux lames de métaux différents dont l'une est attaquée par l'acide tandis que l'autre ne prend aucune part à l'action chimique, par exemple : une lame de cuivre et une de zinc, ou un morceau de platine et un de zinc, la réaction chimique qui s'opère a pour effet d'établir une différence de potentiel entre le métal attaqué et celui qui ne l'est pas. Le potentiel du métal attaqué s'abaisse tandis que celui de l'autre lame s'élève; il en résulte que si l'on réunit les deux lames par un conducteur *a*, *b*, *c*, placé à l'extérieur du vase, il s'établira dans ce fil un courant allant du métal non attaqué vers l'autre. A l'intérieur du vase, au contraire, le courant va du zinc au cuivre ou au platine, en vertu de la force électro-motrice due à la réation chimique.

Fig. 91.

L'appareil que nous venons de décrire constitue un *élément de pile* dans sa forme la plus simple.

Le corps dont le potentiel est le plus élevé constitue le *pôle positif de la pile ou l'électrode positive;* l'autre est le *pôle négatif ou électrode négative.*

Nous allons passer succinctement en revue les différents phénomènes qui se passent dans la pile.

123. **Énergie chimique et calorifique dépensée dans une pile.** — Prenons, comme tout à l'heure, un vase en verre, contenant de l'acide sulfurique étendu et plongeons y un morceau de zinc. Le zinc va se dissoudre dans l'eau acidulée en donnant lieu à une vive effervescence et à un dégagement de bulles de gaz hydrogène. Il se produit la réaction indiquée par la formule chimique :

$$H^2SO^4 + Zn = ZnSO^4 + H^2.$$

Le zinc, en vertu de son affinité pour l'acide sulfurique, chasse l'hydrogène en donnant lieu à un dégagement de chaleur que l'on peut constater en plongeant un thermomètre *t* dans le vase (fig. 92).

Fig. 92.

Plaçons maintenant dans le bocal une lame de platine P*t*, à côté de la lame de zinc, et mettons les électrodes P*t* et Z*n* respectivement en communication avec les plateaux d'un électromètre condensateur (fig. 93). Séparons les plateaux de l'électromètre et nous pourrons constater par la divergence des feuilles

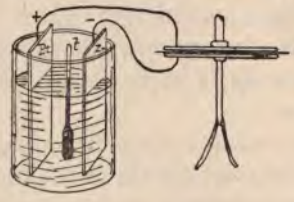


Fig. 93.

d'or qu'il y a une différence de potentiel entre le platine

et le zinc, cependant il n'y a pas de courant extérieur; si nous examinons le thermomètre *t*, nous pourrons constater qu'il accuse toujours une forte élévation de température.

Enlevons l'électromètre et remplaçons le par un galvanomètre G (fig. 94), nous constaterons que l'aiguille aimantée dévie fortement, et le sens de la déviation nous renseigne sur la direction du courant. Dans ces nouvelles conditions, le thermomètre n'accuse plus une augmentation de température aussi considérable.

Dans la première expérience (fig. 93), comme il n'y a pas de courant extérieur, toute l'énergie chimique se transforme en énergie calorifique, dans la seconde, une partie de l'*énergie chimique* est transportée hors de l'appareil le long du fil conducteur, sous forme d'*énergie électrique*. Cette énergie électrique peut se retransformer en énergie calorifique, chimique, mécanique, etc.

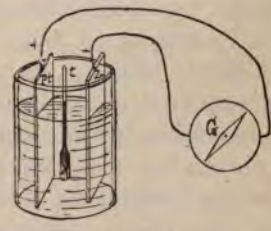


Fig. 94.

Il se produit une suite de phénomènes analogues à ceux qui se passent dans une machine à vapeur. Dans le foyer de la chaudière, on consomme du charbon, c'est-à-dire que l'énergie chimique provenant de la combinaison de l'oxygène de l'air avec le carbone produit de la chaleur. Cette chaleur s'en va par rayonnement et par la cheminée. Mais si dans ce foyer on place une chaudière à vapeur, une partie de la chaleur va être employée à vaporiser l'eau, la vapeur d'eau conduite à grande distance dans des tuyaux emportera une partie de la cha-

leur du foyer, comme le courant électrique emporte, mais sous une autre forme, une partie de la chaleur produite par la combustion du zinc dans l'acide sulfurique.

124. **Polarisation.** — Examinons maintenant la façon de se comporter de notre élément de pile.

Au moment où nous avons fermé le courant à travers le galvanomètre, nous observons une forte déviation, après quelques oscillations, l'aiguille reste stationnaire, mais petit à petit la déviation diminue, l'intensité du courant devient donc moindre.

Nous remarquerons que les lames métalliques et surtout la lame positive se recouvre de bulles gazeuses provenant de la réation chimique. Au bout d'un certain temps, la lame positive est recouverte d'une couche presque continue d'hydrogène. Ces gaz agissent de deux façons différentes, d'abord ils présentent une faible conductibilité électrique, ce qui augmente la résistance que doit vaincre le courant pour passer à travers l'élément, en second lieu, les éléments chimiques décomposés par la pile ont une tendance à se recombiner et à donner lieu à un courant de sens inverse à celui créé par l'élément zinc, platine, acide sulfurique. On dit que l'élément est polarisé.

Nous pouvons prouver, par l'expérience suivante, que les composants, mis en liberté, créent une force contre électro-motrice.

Formons un circuit de la façon suivante : Une pile P, une clef A, un Voltamètre à eau acidulée V, un galvanomètre G. Entre les points *a* et *b* est placé un interrupteur B (fig. 95). Le Voltamètre est constitué par deux tubes en verre, contenant chacun une lame de platine

ou de plomb, et plongeant dans une cuvette contenant de l'eau acidulée.

Fermons la clef A et laissons B ouvert, l'une des cloches du Voltamètre va se remplir d'hydrogène et l'autre d'oxygène. Le galvanomètre dévie dans un certain sens ; quand l'une des cloches est remplie d'hydrogène, ouvrons A et fermons B, la pile est ainsi mise hors du circuit ; le galvanomètre accuse le passage d'un courant de sens contraire à celui qui le traversait auparavant, en même temps, on voit l'H et l'O disparaître et l'eau remonter dans les deux tubes ; nous avons donc créé une pile dont la force électro-motrice, due à l'affinité de l'hydrogène pour l'oxygène, est de sens contraire à celle de l'élément Zn Pt.

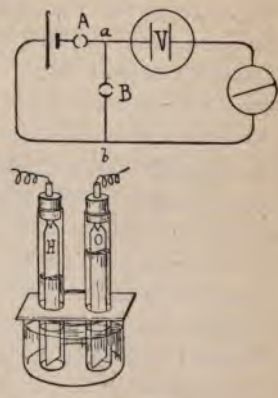


Fig. 95.

Les phénomènes que nous avons produits à l'extérieur de la pile, se produisent à l'intérieur.

La présence de l'hydrogène sur la lame positive a donc pour effet d'augmenter la résistance au passage du courant et de donner lieu à une f. e. m. de sens contraire à celle de l'élément et qui, par conséquent, vient en déduction de celle-ci, c'est ce que l'on appelle la polarisation de la pile.

125. **Moyen d'empêcher la polarisation.** — Pour empêcher la polarisation, il faut se débarrasser de l'hydrogène au fur et à mesure qu'il se forme. Pour cela il existe différents procédés : 1° *les moyens mécaniques*, agiter le

liquide, frotter la lame positive pour faciliter le dégagement de l'hydrogène, rendre la lame positive rugueuse pour que les bulles de gaz en s'assemblant sur les rugosités se dégagent avec plus de facilité; 2° *les moyens chimiques*, absorber l'hyrogène au fur et à mesure de sa formation, et cela par l'emploi de réactifs chimiques convenablement choisis.

Prenons un couple formé d'une lame de zinc, comme pôle négatif, et d'un morceau de charbon de cornue comme positif. Cet élément se polarise très rapidement, l'aiguille du galvanomètre intercalée dans le circuit revient assez vite vers le zéro, mais si nous agitons le liquide, ou si nous frottons le charbon avec un pinceau pour enlever les bulles de gaz qui y adhèrent, la déviation reprend sa valeur primitive.

Pour absorber l'hydrogène, l'un des moyens qui se présente à l'esprit, c'est de mettre en présence de l'H, au moment où il se forme, une matière très riche en oxygène, l'acide nitrique par exemple.

$$2HNO^3 + 2H = 2H^2O + N^2O^4.$$

L'hydrogène se combine avec l'oxygène pour former de l'eau, et il se dégage du bioxyde d'azote.

Pour mettre ce moyen en pratique, plongeons notre charbon dans l'acide nitrique, avant de le mettre dans la pile. Il absorbera une certaine quantité d'acide par porosité, et le courant restera constant aussi longtemps que l'hydrogène rencontrera de l'acide azotique non décomposé.

126. **Amalgamation.** — Le courant obtenu par la pile simple que nous avons décrite (fig. 91) est beaucoup plus constant lorsque l'on emploie du zinc chimiquement pur. Dans ce cas, bien qu'il existe une différence

de potentiel entre le zinc et la pôle positif de la pile, l'action de l'eau acidulée sur le zinc est presque nulle aussi longtemps que le circuit n'est pas fermé. Le courant détermine alors la décomposition de l'électrolyte et le zinc se dissous.

Comme le zinc, chimiquement pur serait trop coûteux pour les emplois courants, on se contente du zinc laminé du commerce ; on doit exclure le zinc coulé qui est trop poreux, ne s'use pas régulièrement et se désagrège lorsque la couche extérieure est dissoute. Le zinc doit être aussi pur que possible et exempt de corps étrangers surtout de fer, de plomb et d'arsenic, qui créeraient des actions locales dans l'électrode même et amèneraient une destruction rapide. On arrive à fabriquer couramment des zincs qui ne contiennent que 0,010 à 0,012 de fer.

Le physicien Kemp a reconnu que le zinc amalgamé, c'est-à-dire allié au mercure, se comporte comme s'il était chimiquement pur, c'est-à-dire qu'il se dissout difficilement dans l'eau acidulée, de sorte que la consommation à circuit ouvert est presque nulle.

Pour amalgamer le zinc il faut décaper sa surface en le plongeant dans de l'eau acidulée par l'acide chlorydrique ou sulfurique. Quand la surface est bien propre, on la frotte de mercure au moyen d'une brosse dure, ou d'un tampon de drap placé ou bout d'un bâton.

On place le mercure dans une cuvette plate et on le recouvre d'un peu d'eau acidulée par l'acide sulfurique, afin de dissoudre l'oxyde de zinc qui pourrait ternir la surface.

Il faut avoir soin d'éviter de frotter le zinc avec la main nue, parce que les sels de mercure sont très vénéneux et peuvent occasionner des empoisonnements.

On peut aussi plonger le zinc à amalgamer dans une solution concentrée de sulfate de mercure.

Dans l'amalgamation le mercure s'allie au zinc et pénètre d'autant plus profondément que l'opération de l'amalgamation aura été prolongée plus longtemps. Le mercure métallique ne prend aucune part aux actions chimiques qui se produisent dans la pile et on le retrouve à l'état de globules au fond des éléments. Si l'on veut se donner la peine de le recueillir, on peut le réemployer de nouveau.

Lorsque la couche d'amalgame de zinc est dissoute il faut recommencer l'opération.

127. **Force électro-motrice.** — Nous avons vu (122) que dans une pile, il s'établit entre les électrodes une différence de potentiel ou force électro-motrice qui détermine un courant dans le circuit extérieur. Cette force électro-motrice s'exprime en Volts.

Sa grandeur dépend exclusivement de la nature des corps qui entrent dans la composition de l'élément; elle est d'autant plus grande que la différence d'affinité du liquide pour les matières constituant le pôle positif et le pôle négatif est plus grande.

Ainsi, la force électro-motrice d'un élément, cuivre, zinc, acide sulfurique est plus grande que celle d'une pile fer, zinc et acide sulfurique.

La *force électro-motrice est indépendante de la surface des éléments en présence.*

128. **Résistance intérieure.** — La pile offre par elle-même une résistance au passage du courant, il y a donc une certaine partie de l'énergie qui est dépensée dans la pile elle-même pour faire circuler le courant à travers le liquide et les électrodes.

Sous ce rapport les piles suivent les lois générales des conducteurs; c'est-à-dire que la résistance varie avec la nature des composants, et que pour un même système elle est d'autant plus faible que les dimensions des éléments sont plus grandes.

129. **Intensité du courant que peut produire une pile.** — Lorsque l'on réunit les deux pôles d'une pile par un conducteur, l'intensité du courant qui s'établit dans ce dernier dépend de la force électro-motrice de la pile et de la résistance du circuit.

Fig. 96.

Soit (fig. 96), une pile P d'une force électro-motrice de $1^{V},5$ par exemple et d'une résistance intérieure de 2 Ohms.

Si nous fermons le circuit au moyen d'un conducteur *a b c* de 10 Ohms de résistance, l'intensité du courant sera d'après la formule d'Ohm.

$$\text{Intensité} = \frac{1,5}{10+2} = 0^{A},125 \text{ ou } 125 \text{ milliampères.}$$

Remplaçons *a b c* par une résistance de 100 Ohms, l'intensité devient $\frac{1.5}{100+2} = 0^{A},0147$ ou 14,7 milliampères.

Lorsque l'on fait produire à une pile un courant intense, l'action chimique qui se passe à l'intérieur de l'élément est naturellement beaucoup plus active que quand le courant est plus faible; il y a donc un dégagement plus abondant de gaz aux électrodes d'où résulte une polarisation plus rapide. Il en résulte que pour produire des courants intenses au moyen d'une pile, il faut se ménager des moyens de dépolarisation très actifs.

130. **Force électro-motrice à circuit fermé et à circuit ouvert.** — Si nous prenons un élément de pile et si nous mesurons sa force électro-motrice à circuit ouvert, c'est-à-dire lorsqu'elle ne donne pas de courant, nous trouvons une certaine valeur. Lorsque nous fermons le circuit par une résistance *a b c*, et que nous mesurons la force électro-motrice agissant entre *a* et *c* (fig. 96), nous trouvons un nombre plus petit que dans l'expérience précédente. Voici l'interprétation de ce fait.

Dans l'exemple que nous avons cité au § précédent (129) nous avons pris d'abord le cas du circuit fermé à travers une résistance extérieure de 10 Ohms. La force électro-motrice $1^v,5$ doit faire circuler 125 milliampères à travers le circuit complet, une partie de la f. e. m. est employée à faire passer les 125 milliampères à travers la pile, et comme la résistance de celle-ci est de 2 Ohms, cette partie est donnée par la loi de Ohm

$$\text{f. e. m.} = \text{Résistance} \times \text{Intensité}$$

$$\text{f. e. m.} = 2 \times 0{,}125 = 0{,}250$$

Il y a donc 1/4 de Volt employé à vaincre la résistance intérieure et il reste $1^v,25$ de force électro-motrice entre *a* et *c* pour faire circuler le courant dans *a b c*.

$$\text{f. e. m.} = 10 \times 0{,}125 = 1^v,25$$

Pour un courant moins intense, de 14,7 milliampères, le f. e. m. nécessaire pour vaincre la résistance de la pile ne sera que de

$$2 \times 0{,}064 = 0^v,0294 \text{ soit } 0{,}03$$

Donc le circuit étant fermé à travers 10 Ohms, la f. e. m. aux bornes de la pile sera de $1^v,25$ et de $1^v,50 - 0{,}03 = 1^v,47$ lorsque la résistance extérieure est de 100 Ohms, alors que la différence de potentiel établie entre les deux électrodes à circuit ouvert est de $1^v,5$.

Nous allons tâcher de représenter graphiquement les phénomènes que nous venons d'exposer.

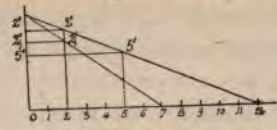


Fig. 97.

Sur une ligne horizontale (fig. 97) portons des longueurs égales 0—1, 1—2, 2—3, etc., qui représentant chacune 1 Ohm 0 — 12 représentera la résistance, totale du circuit; portons sur la verticale une longueur 02″, qui représente la force électro-motrice de la pile. Joignons 2″ — 12. Cette ligne indiquera la chute de potentiel depuis le point de potentiel le plus élevé jusqu'au point où le potentiel est le plus bas.

Pour circuler à travers toute la résistance, le courant de 125 milli-ampères, exige une force électro-motrice de $1_{v},5$. Pour circuler de 5 à 12, c'est-à-dire à travers les 7/12 de la résistance, il faut également les 7/12 de la force électro-motrice totale. Car comme l'intensité est partout la même dans le conducteur, d'après la loi d'Ohm.

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Force électro motrice entre 0 et 5}}{\text{Résistance 0 à 5}}$$

$$= \frac{\text{Force électro motrice entre 0-12}}{\text{Résistance 0 à 12}}$$

ou

$$\frac{\text{Force électro motrice entre 0 et 5}}{\text{Force électro motrice entre 0 et 12}} = \frac{7}{12}.$$

Or les deux triangles 2″0 (12) — 12 et 5 — 5′ — (12) étant semblables, on a $\frac{5 - 5'}{OB} = \frac{7}{12}$.

$02''$ représentant la f. e. m. totale, $55'$ représentera la f. e. m. qui fait circuler le courant dans les 7/12 de la résistance et $2''5 = 02'' - (55')$ représente la f. e. m. nécessaire pour vaincre les 5/12 de la résistance du circuit.

La résistance intérieure de la pile étant de 2 Ohms, $02'' - 22'$ représentera de même la f. e. m. nécessaire pour surmonter la résistance intérieure et la tension utilisable sera représentée par $(2 - 2')$.

Si au lieu d'un circuit extérieur de 10 Ohms de résistance, nous avions seulement un conducteur de 5 Ohms, la chute de potentiel le long de ce conducteur serait représentée par la droite $2''7$, et la f. e. m. utile ne serait que de $(2 - 2'_1)$. Ce qui s'explique, car la résistance extérieure devenant plus faible, l'intensité devient plus grande, il faut donc une pression plus considérable pour faire circuler le courant.

Comparons ce qui se passe dans une pile avec les phénomènes que l'on observe lorsqu'il s'agit de fluides pesants, l'eau, par exemple. Soit un réservoir A rempli d'eau (fig. 98) en communication avec un conduit BC terminé par un robinet. Quand le robinet est fermé,

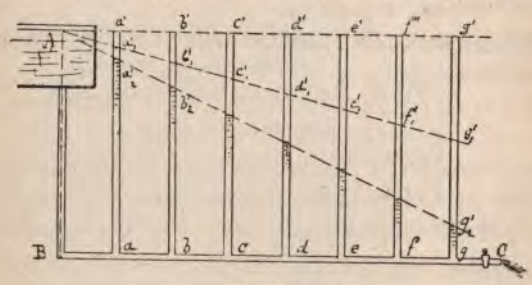


Fig. 98.

l'eau du réservoir est à un potentiel plus élevé que la sortie C; comme dans une pile à circuit ouvert, l'une des électrodes est à un potentiel plus élevé que l'autre. Tant qu'il n'y a pas de courant, les manomètres a, b, c, d, indiquent tous la même pression de B jusqu'en C. Ouvrons le robinet et laissons d'abord un courant de faible intensité s'établir, la perte de charge le long du conducteur sera faible et les manomètres indiqueront les pressions aa'_1 bb'_1 cc'_1..... Mais au fur et à mesure que l'on ouvrira le robinet, c'est-à-dire que la résistance au courant sera diminuée, on verra les pertes de charge s'accentuer par les différences de niveau de l'eau dans les manomètres.

131. **Énergie produite par une pile.** — Nous savons par la loi de Joule que la quantité d'énergie produite dans un conducteur pendant l'unité de temps est égale au produit de la force électro-motrice par l'intensité du courant, ou au produit du carré de l'intensité par la résistance. Dans une pile fournissant un courant d'une certaine intensité l'énergie se décompose en deux parties, qui nous sont indiquées par la relation : Énergie totale = Intensité^2 × (Résistance intérieure + Résistance extérieure).

L'énergie du circuit extérieur est seule utilisable; l'autre constitue une perte.

132. — **Qualités que doivent présenter les piles pour les usages de la pratique.**

Les piles dont on fait usage dans l'industrie doivent présenter des qualités différentes suivant le travail que l'on veut en obtenir. Ainsi pour les appareils télégraphiques, les sonneries d'appartements, les appareils téléphoniques, il suffit d'intensités de courants faibles, mais il faut que l'entretien soit presque nul et que la durée soit longue.

Pour d'autres usages tels que la galvanoplastie, il faut au contraire une intensité considérable, mais les parties constituant les éléments peuvent être renouvelées plus souvent.

En règle générale, les piles doivent être : 1° simples et économiques; 2° donner une force e. m. suffisamment constante et suffisamment élevée pour ne pas devoir multiplier trop les éléments; 3° l'entretien doit être facile; 4° elles ne doivent pas donner lieu à des dégagement de gaz nuisibles.

133. **Différents systèmes de piles employés dans la pratique.** — Nous pouvons classer les piles d'après la façon dont se fait la dépolarisation.

Piles à un seul liquide	Simple sans dépolarisant	. . . . . Volta. . . . . . Wollaston.
	Dépolarisant mécanique	. . Electrodes rotatives. . . . . . Smée.
	Dépolorisant liquide	Piles au bichromate de potassium. . . . . . Poggendorf.
	Dépolarisant solide.	. . . Warren de La Rue. . . . . . Leclanché. . . . Lalande et Chaperon.
Piles à deux liquides	Dépolarisant Acide nitrique	. . . . . Grove. . . . . . Bunsen. . . . . . Pile au Chlore.
	Dépolarisant formé par une dissolution saline	Daniell et Variantes. Minotto, Callaud, Gravity, etc. Meydinger. William Thomson. Marié Davy.

134. **PILES A UN SEUL LIQUIDE. — Piles simples sans dépolarisant.** — Je ne parlerai que pour mémoire des piles sans dépolarisant qui ne sont plus en usage aujourd'hui.

La plus célèbre au point de vue historique est la *pile de Volta*.

Elle se compose de couples formés d'une rondelle de cuivre et de zinc empilées les unes sur les autres, le cuivre et le zinc de chaque couple sont séparés par une rondelle de drap imbibée d'acide sulfurique étendu d'eau.

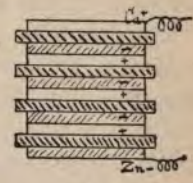


Fig. 99.

Ces couples formaient une colonne ou *pile*. La force électromotrice de cette pile est égale à autant de fois environ un volt qu'il y a de couples.

La résistance intérieure est extrêmement grande, en outre le poids des rondelles fait découler l'eau acidulée le long de la pile, ce qui établit entre les éléments une dérivation par où s'écoule la plus grande partie du courant. En outre la pile est rapidement polarisée.

Pour obvier à ces inconvénients, on a remplacé la forme à colonne par la disposition à auges, ensuite *Wollaston* a perfectionné le système en remplaçant l'auge par des bocaux en verre séparés (fig. 100). En outre il a donné au cuivre un grand développement, ce qui diminue la résistance intérieure.

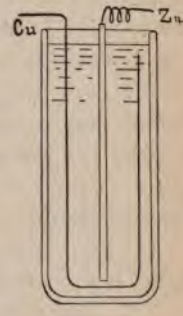


Fig. 100.

C'est avec une pile à auge de 2000 éléments que Davy a fait, en 1808, ses expériences célèbres sur l'arc voltaïque.

135. **Piles simples à dépolarisation.** — On a essayé de produire la dépolarisation des éléments en agitant le liquide ou en employant des électrodes formées de di sques mon-

tés sur un axe et plongeant à peu près jusqu'au centre dans le liquide. Ces disques tournaient lentement et se débarrassaient de la couche de gaz adhérente en sortant du liquide; cette disposition est peu pratique.

136. **Pile Smée.** — Dans cette pile le pôle négatif est constitué par une lame de zinc amalgamé, et le pôle positif par une lame de platine ou d'argent sur laquelle on dispose, par la galvanoplastie, une couche de platine grenu. Les aspérités qui se trouvent à la surface de la lame positive facilitent le dégagement de l'hydrogène. Le liquide excitateur est formé de 1 d'acide sulfurique pour 7 d'eau.

Cette pile a une force électro-motrice très faible, elle est d'environ 0,47 de Volt, comme on peut donner de très grandes dimensions aux plaques positive et négative, la résistance intérieure est petite.

On emploie comme récipient une cuve en bois doublée de gutta-percha, ou des cuves en grès.

Elle peut donner un courant très intense au commencement du montage, mais au fur et à mesure que l'acide est neutralisé, la force électro-motrice diminue.

Elle est employée en galvanoplastie pour les dépôts de cuivre et de nikel.

Pour diminuer le prix de cette pile, *M. Walker* a remplacé la lame d'argent par une plaque de charbon de cornue platiné.

La pile *Walker* s'emploie dans les mêmes conditions que l'élément Smée.

137. **Piles à dépolarisant.** — *Pile de Poggendorf au bichromate de potassium.* Pour rendre la dépolarisation plus active, Poggendorf a mêlé au liquide excitateur de la pile une matière très riche en oxygène, de façon à

absorber l'hydrogène au fur et à mesure de sa formation.

Pôle positif, plaque de charbon de cornue.

Pôle négatif, zinc amalgamé (fig. 101).

Liquide excitateur, solution de bichromate de potasse ou de sodium acidulée par l'acide sulfurique.

Eau 100 parties, bichromate 16, acide sulfurique à 66°, 37 parties.

Préparation. — On réduit le bichromate en poudre en ayant soin de ne pas respirer la poussière, on dissout dans l'eau à la température d'environ 40°, ensuite on ajoute petit à petit l'acide sulfurique. Il faut que la température du local où l'on fait usage de la pile soit supérieure à 15° sinon le sel cristallise.

Fig. 101.

La force électro-motrice est d'environ 2 Volts, la résistance intérieure est faible, quelques centièmes d'Ohm, elle varie suivant les dimensions de l'élément.

On peut obtenir au moyen de cette pile des effets très intenses, seulement quand on lui fait donner un fort courant le charbon s'entoure d'une couche de liquide dont l'oxygène a été absorbé et la pile se polarise. En la laissant quelque temps au repos, elle reprend sa force électro-motrice.

Quand on ne fait pas usage de la batterie il faut retirer le zinc, si non, il est consommé en pure perte.

On donne à cet élément différentes formes, souvent la forme d'un bocal fermé (fig. 102).

Cette pile s'emploie pour obtenir des effets intenses de peu de durée.

Pour les usages médicaux, expériences, etc.

Lorsque le liquide devient bleuâtre, c'est que le bichromate de potassium est épuisé.

Si la pile s'affaiblit sans que la couleur du liquide ait changé d'une façon sensible il faut ajouter de l'acide sulfurique.

Fig. 102.

Le bichromate de potassium coûte assez cher, et en outre il constitue un poison violent.

138. **Piles à un seul liquide à dépolarisant solide. Pile Warren De La Rue.** — Constituants : Pôle négatif (fig. 103), cylindre de zinc chimiquement pur.

Pôle positif, cylindre de chlorure d'argent fondu autour d'un fil d'argent A, formant l'électrode positive. Le tout entouré d'un petit sac en papier parcheminé pour éviter le contact avec le zinc. Liquide excitateur; solution de sel ammoniaque dans l'eau distillée; 1 de sel pour 40 d'eau.

Fig. 103.

Cet élément ne s'emploie que dans de petites dimensions pour produire des courants peu intenses, à cause du prix des constituants.

Un élément de 15 centimètres de haut, 25 millimètres de diamètre avec un zinc de 5 millimètres de diamètre a une résistance intérieure de 3 à 4 ohms. L'élément doit être hermétiquement bouché avec de la paraffine pour éviter la formation d'oxychlorure de zinc.

La force électro-motrice est de $1^{v},45$.

Cet élément s'emploie pour former les piles portatives des petits appareils médicaux. Et en général pour les piles portatives des appareils d'essai.

139. **Pile Leclanché.** — Le pôle négatif est formé par une baguette en zinc, quand on veut diminuer la résistance intérieure, on emploie un cylindre complet.

Le pôle positif est constitué par une lame de charbon de cornue entourée d'un mélange à parties égales de peroxyde de manganèse et de charbon de cornue. Le tout est maintenu par un vase poreux *p* en terre de pipe dégourdie.

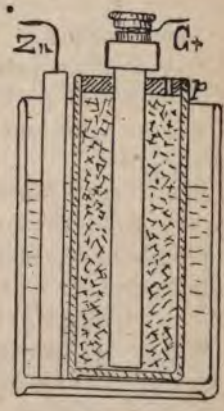


Fig. 104.

On emploie comme liquide excitateur une solution saturée de sel ammoniaque ; à circuit ouvert le zinc amalgamé n'est pas attaqué. Lorsque le courant est fermé, le sel ammoniaque se décompose, il y a formation de chlorure de zinc, d'ammoniaque et d'hydrogène libre. L'hydrogène se porte sur le peroxyde de manganèse et le réduit à l'état de sesqui-oxyde.

La force électro-motrice de l'élément Leclanché est de $1^{v},46$; sa résistance intérieure d'environ 2 ohms pour le type à crayon de zinc généralement employé. (Vase poreux de 0,13 de hauteur et 0,06 de diamètre) (fig. 104).

Le vase poreux n'est là que pour retenir le mélange de charbon et de peroxyde il doit donc être aussi poreux que possible, cependant, des vases trop poreux auraient

une tendance à s'écailler et à se briser par suite des cristallisations qui se forment à l'intérieur.

A la température de 14° le vase poreux, rempli d'eau, doit se vider au bout de 160 à 180 heures.

Les vases qui ne sont pas assez poreux augmentent inutilement la résistance intérieure.

Le charbon de cornue et le peroxyde de manganèse doivent être concassés en morceaux de la grosseur d'un petit pois, on doit écarter la poussière et le mélange doit être bien homogène.

Le peroxyde de manganèse doit être très pur et contenir au moins 85 p. 100 de peroxyde de manganèse, le meilleur est celui qui se présente sous la forme d'une masse aiguillée.

Les meilleures lames de charbon sont celles en charbon de cornue sciées. La lame de charbon porte une tête en plomb coulé, dans laquelle on insère une borne en laiton pour fixer les fils de connexion (fig. 105). Il faut rendre le dessus de la lame imperméable au sel ammoniaque, sinon celui-ci par capillarité s'élèverait à l'intérieur de la tête et viendrait ronger le plomb en formant du chlorure de plomb qui présente une grande résistance. Pour éviter cet inconvénient, on plonge l'extrémité supérieure de la lame dans de la paraffine chauffée à 110° au moins, pour la priver de son eau, la paraffine bouche les pores du charbon.

Fig. 105.

On enlève l'excès de paraffine avant de couler la tête.

Pour un élément, il faut une charge de 100 gr. de sel ammoniaque.

Comme le peroxyde de manganèse ne cède que lente-

ment son oxygène, cette pile ne convient pas pour donner des courants continus intenses ; elle convient particulièrement pour les émissions de courte durée comme dans les sonneries tremblèuses, les appareils télégraphiques Morse à courants interrompus.

Quand accidentellement une pile Leclanché a fourni un courant continu pendant assez longtemps, sa force électro-motrice tombe, il faut alors la laisser reposer pendant quelque temps.

Entretien. — L'entretien est presque nul; il suffit d'enlever les sels grimpants, de nettoyer de temps en temps le zinc, de remettre de l'eau dans les bocaux quand celle-ci s'est évaporée.

La chaleur provoque la formation de sels grimpants.

140. **Variantes de l'élément Leclanché.** — Pour diminuer la résistance, on pratique quelquefois des fentes ou bien des trous dans le vase poreux; ce système est employé par la Compagnie du Nord Français.

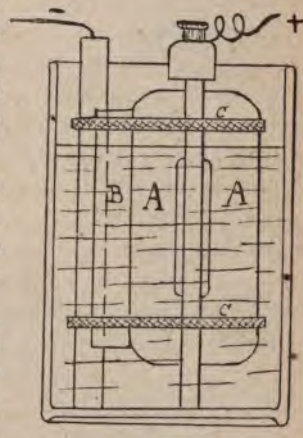


Fig. 106.

On a même totalement supprimé le vase poreux, et l'on a aggloméré le peroxyde de manganèse sous la forme de briquettes AA (fig. 106), le zinc doit être isolé des agglomérés au moyen d'une pièce B en bois ou en terre cuite, si le zinc venait en contact avec le charbon, l'élément fonctionnerait en court circuit et serait très

rapidement hors d'usage; le tout est maintenu par deux bandelettes de caoutchouc.

On a également donné aux agglomérés la forme d'un cylindre creux (fig. 107), le zinc étant placé au centre.

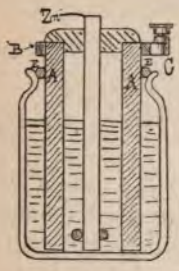


Fig. 107.

A agglomméré cylindrique.

B anneau en plomb.

C bouchon en bois.

Z zinc.

D anneau en caoutchouc pour empêcher le contact du zinc et du pôle positif.

E rondelle en caoutchouc pour fermer hermétiquement le bocal.

Cette forme empêche l'évaporation du liquide et la formation des sels grimpants.

141. **Pile Warnon.** — M. Warnon a remplacé le vase poreux par un sac en toile grossière; cette disposition est très avantageuse, elle diminue considérablement la résistance intérieure de l'élément, facilite le passage de l'hydrogène, et par conséquent la dépolarisation, quand on emploie une toile trop serrée elle se gonfle dans l'eau et devient imperméable.

142. **Piles sèches.** — On construit des piles portatives dont on supprime le liquide de la façon suivante : on remplit tout l'intervalle existant entre le vase poreux et le bocal extérieur par un corps poreux, comme de l'asbeste ou de la sciure de bois que l'on imprègne de la solution saline. Quelquefois, on emploie une pâte gélatineuse dans laquelle on a incorporé le sel ammoniaque. L'élément doit être très bien fermé pour éviter la dessiccation.

Dans les piles sèches on remplace souvent le bocal en verre par un vase en zinc, constituant l'électrode négative. Il faut avoir soin de veiller à ce qu'il n'y ait pas contact à l'intérieur de l'élément entre les deux électrodes, sinon la pile est un court circuit, le zinc se ronge rapidement et l'élément doit être mis au rebut.

143. **Pile Lalande et Chaperon.** — Constituants : zinc, potasse caustique. — Fer positif. — Dépolarisant, oxyde de cuivre.

Z. Zinc.

A. Boîte en tôle contenant de l'oxyde de cuivre comme dépolarisant.

B. Fil isolé à la gutta-percha. Liquide excitateur : Solution concentrée de potasse ou de soude caustique.

Fig. 108.

Force électro-motrice, 0,95 Volt.

Résistance intérieure : 1 à 2 ohms, suivant les dimensions. Donne un courant très constant, ne se polarise pas rapidement.

Excellente pile pour postes téléphoniques et petits bains de galvanoplastie.

Inconvénients : Les constituants de cette pile coûtent cher, la potasse ou la soude caustique sont d'un maniement désagréable, ces produits attaquent tout, même les bocaux en verre. On construit ces éléments en employant des bocaux en fonte, formant électrode positive. La fonte n'est pas attaquée par les alcalis caustiques.

Le zinc est isolé alors au moyen de caoutchouc.

144. **PILES A DEUX LIQUIDES.** — Dans les piles à deux

liquides, l'électrode positive est placée dans un vase poreux, contenant un liquide très oxygéné, comme de l'acide nitrique, ou du bichromate de potassium, qui brûle l'hydrogène au fur et à mesure que celui-ci traverse le vase poreux pour se rendre au pôle positif; ou bien on emploie une solution saline, contenant un sel très facilement réductible par l'hydrogène, comme le sulfate de cuivre, par exemple.

145. **Pile de Grove** (fig. 109). — Pôle négatif : zinc amalgamé. Pôle positif : lame de platine A, plongeant dans l'acide nitrique fumant contenu dans un vase poreux B.

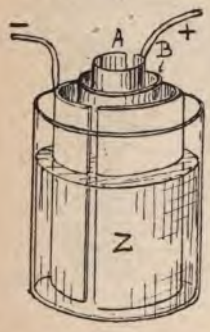


Fig. 109.

Liquide excitateur : 1 d'acide sulfurique pour 9 d'eau.

Force électro-motrice : 1v,93.

Résistance intérieure : faible, quelques dixièmes d'ohm, elle varie avec les dimensions de l'élément.

146. **Pile Bunzen.** — Même composition, sauf que la lame de platine est remplacée par une lame de charbon de cornue, à laquelle on donne de grandes dimensions pour diminuer sa résistance.

Dans le but d'arriver à réduire la résistance intérieure à un minimum, Rhumkoff a donné à l'élément Bunzen la forme rectangulaire de façon à pouvoir donner plus de développement au pôle positif (fig. 110).

Force électro-motrice : 1v,87.

La résistance n'est que de quelques dixièmes d'ohm, elle varie avec les dimensions.

Cette pile peut donner des courants très intenses, la dépolarisation est très rapide.

147. **Inconvénients des piles à acide nitrique.** — Ce liquide donne lieu à un dégagement de vapeurs délétères et corrosives.

La force électro-motrice va en diminuant avec la contraction des acides.

Même quand le courant n'est pas fermé, l'acide nitrique filtre à travers le vase poreux et vient attaquer le zinc, ce qui donne lieu à une grande consommation de zinc et d'acide.

Fig. 110.

Malgré ses défauts, la pile Bunzen, est la pile primaire la plus convenable pour produire des courants intenses de quelque durée, avant les machines dynamo on s'en servait pour la lumière électrique.

148. **Pile au chlore.** — On a préconisé l'emploi de l'eau régale comme dépolarisant, ce qui revient à faire usage du chlore, en le produisant par l'action de l'acide nitrique sur l'acide chlorhydrique. Cette pile donne une grande force électro-motrice, mais elle produit des vapeurs qui sont encore plus désagréables que celles qu'émet la pile de Bunzen.

149. **Piles à dépolarisant formé par une dissolution saline. — Pile Daniell.** — La pile Daniell est le type classique de ce genre d'éléments, dont l'usage est très répandu en télégraphie lorsque l'on doit obtenir des courants continus et constants d'une intensité inférieure à 50 milliampères.

Composants (fig. 111) : zinc dans une dissolution de

sulfate de zinc saturée, ou dans l'acide sulfurique étendu.

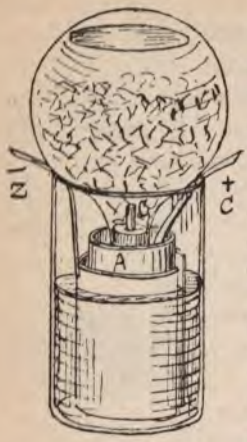


Fig. 111.

Le pôle positif est formé par une lame de cuivre plongeant dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre, renfermée dans unvase poreux A.

Pour maintenir la solution de sulfate de cuivre saturée, on place sur le vase poreux un ballon renversé B, contenant de l'eau et des cristaux de sulfate. Lorsque par suite de la réduction du sulfate de cuivre par l'hydrogène, la concentration de la liqueur contenue dans le vase poreux diminue, comme la dissolution contenue dans le ballon est plus dense, il s'établit un courant dans le tube de communication C. De cette façon la concentration de la liqueur reste toujours la même.

Le sulfate de cuivre à employer doit être pur, exempt de fer et de zinc; il doit contenir au moins 30 p. 100 d'oxyde de cuivre.

Pour que cette pile fonctionne dans de bonnes conditions, il faut que le courant soit continu. Lorsque la pile reste en repos, le sulfate de cuivre suinte à travers le vase poreux, le zinc le décompose et se recouvre d'une couche de cuivre, ce qui donne lieu à une usure inutile des éléments et par conséquent à une grande dépense d'entretien.

Aussi le vase poreux ne doit pas laisser filtrer trop rapidement le liquide.

Pour les dimensions des vases employés en télégraphie 45 millimètres de diamètre et 130 millimètres de hauteur, les vases remplis d'eau doivent se vider en 230 à 250 heures à la température de 14°.

Au bout d'un certain temps de service, le vase poreux se tapisse complètement à l'intérieur de cuivre, réduit ce qui bouche les pores du vase et empêche le fonctionnement de la pile.

Les vieux vases poreux sont revendus pour en retirer le cuivre qui s'y trouve.

Force électro-motrice 1.06 Volt.

Résistance intérieure du modèle ordinaire environ 10 Ohms.

150. **Variantes de la pile Daniell. — Pile Meydinger.** — Pour les installations où l'on a besoin de courants absolument continus, on emploie des modèles de pile où l'on a supprimé le vase poreux, le modèle généralement employé en Allemagne et en Russie est la pile *Meydinger* (fig. 112). Dans cette pile on emploie une solution de sulfate de magnésie au lieu de sulfate de zinc comme liquide excitateur. La séparation des deux liquides se fait par différence de densité, la solution de sulfate de cuivre étant plus dense que la solution de sulfate de zinc et de magnésie qui se forme par suite du fonctionnement.

Fig. 112.

Il faut avoir bien soin que le ballon qui contient la provision de sulfate de cuivre soit hermétiquement

bouché, sinon le niveau monte au-dessus de l'orifice du goulot et vient atteindre le zinc.

Pour que cette pile marche bien il faut qu'elle ne subisse pas de chocs, et que le courant soit continu, sinon il y a mélange des liquides et consommation inutile de zinc et de sulfate de cuivre.

151. **Pile Minotto.** — Dans cette pile on produit la séparation des liquides par une couche de sable. Au fond du bocal on place des cristaux de sulfate de cuivre, sur lesquels repose une spirale en fil de cuivre munie d'un conducteur isolé à la gutta-percha (fig. 113).

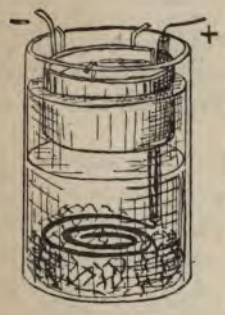


Fig. 113.

Sur le sulfate de cuivre on place une couche de sable, puis la solution de sulfate de zinc et le zinc.

152. **Pile Caland.** — C'est la même pile que la précédente, sauf que la couche de sable a été supprimée; la séparation des liquides se fait uniquement par la différence des densités.

Elle est employée pour la télégraphie en France et sur une très grande échelle en Amérique. Seulement les Américains donnent aux électrodes une grande surface, ils donnent au cuivre et au zinc la forme d'une étoile; mais pour cela ils sont obligés d'employer du zinc coulé ce qui est désavantageux ainsi que nous l'avons fait remarquer (fig. 114).

La pile Daniell et ses modifications ne conviennent guère que pour la télégraphie; elles ne conviennent nullement pour donner des courants de haute intensité comme ceux exigés pour la lumière électrique, et cela à

cause de leur grande résistance intérieure et du prix élevé du sulfate de cuivre. Elles conservent pendant longtemps une force électro-motrice très constante.

Fig. 114.

153. **Pile Marié-Davy.** — Cette pile a été beaucoup employée autrefois; c'est une pile Daniell dans laquelle on met du sulfate de mercure dans le vase poreux au lieu de sulfate de cuivre, parcé que ce sel se réduit encore plus facilement par l'hydrogène. On emploie le charbon comme électrode positive.

La force électro-motrice est de 1,5 Volt.

Ce système a été abandonné à cause du prix élevé du sulfate de mercure et des propriétés toxiques de ce sel.

154. **Piles étalons.** — La pile étalon la plus commode est l'étalon employé par le Post-Office anglais. Il se compose d'une boîte en bois rectangulaire contenant trois bocaux en ébonite (fig. 115).

Fig. 115.

Le 1er A contient une solution de sulfate de zinc.

Le 3e C une solution de sulfate de cuivre.

Celui du milieu B constitue l'élément de pile véritable, c'est un élément Daniell à vase poreux.

Le vase poreux est rempli de cristaux de sulfate de cuivre; quand on s'est servi de l'élément, on met le zinc dans le compartiment A, le vase poreux dans C, il ne reste plus dans B que la solution de sulfate de zinc. Au

fond de B, on place une baguette de zinc qui précipite tout le cuivre du sulfate de cuivre qui a filtré inutilement à travers le vase poreux.

La force électromotrice est très constante, elle est de 1,067 volt légal.

155. **Pile étalon de Latimer Clarke.** — Pour faire un élément étalon Latimer Clarke, on prend un tube à réaction de 20 millimètres de diamètre environ. On fait passer à travers le fond un fil de platine qui va servir d'électrode positive (fig. 116).

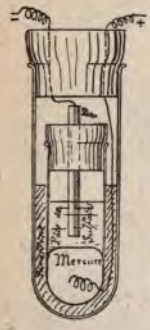


Fig. 116.

On met au fond du tube du mercure chimiquement pur, parfaitement distillé, qui forme le pôle positif.

Sur le mercure on met une couche de pâte formée en mélangeant dans un mortier du sulfate de zinc et du sulfate de mercure avec un peu de carbonate de zinc, on ajoute de l'eau distillée de façon à en faire une pâte assez légère, on met un peu de sulfate de zinc en excès; ayant placé une couche d'environ 25 millimètres de cette pâte sur le mercure, on y plonge une baguette de zinc chimiquement pur qui est maintenue par un bouchon en caoutchouc non vulcanisé. Le zinc ne doit pas toucher le mercure. Le pôle négatif est prolongé par un fil de platine. On met le premier tube dans un tube plus grand, comme l'indique la figure 116; le tube du milieu peut être maintenu en coulant de la paraffine entre les deux.

Cet élément a une force électromotrice très constante de 1.435 quand il est bien fabriqué. Il ne faut jamais s'en servir qu'en circuit ouvert, ou en faisant passer le

courant à travers une résistance considérable, plusieurs milliers d'ohms.

Pour les usages ordinaires de la télégraphie, on emploie l'élément étalon Daniell, modèle Post-Office. — Pour les expériences plus précises on fait usage de l'étalon de Clarke.

156. **Accouplement des piles.** — Lorsque l'on veut produire des effets intenses, au moyen des piles, on réunit plusieurs éléments de façon à former ce que l'on appelle une batterie ou simplement une pile. On peut disposer les éléments de pile de différentes façons dans la batterie.

a) *En tension.* Si (fig. 117) l'on réunit le pôle + du premier élément, au pôle négatif du second et ainsi de suite, les forces électromotrices des éléments agissent toutes dans le même sens et s'ajoutent. Mais comme le courant total produit traverse tous les éléments, les résistances intérieures s'ajoutent également.

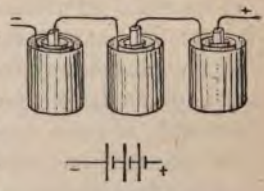


Fig. 117.

La force électromotrice et la résistance intérieure de la batterie sont donc égales au produit de la force électro motrice et de la résistance intérieure d'un seul élément par leur nombre total.

b) *En quantité.* On peut accoupler les éléments en réunissant ensemble tous les pôles positifs et tous les pôles négatifs (fig. 118). Le courant se divise entre tous, par conséquent la résistance opposée au passage est moindre qu'avec un seul; mais, la force électromotrice est la même que celle de chacun d'eux; car les éléments ainsi accouplés se comportent comme un seul dont les dimen-

sions seraient égales à la somme de celles des éléments partiels.

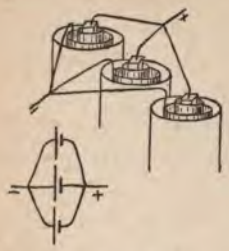


Fig. 118.

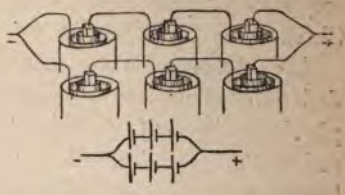


Fig. 119.

c) *En séries parallèles*. On peut réunir une partie des éléments en quantité et une partie en tension, de façon à former plusieurs séries parallèles (fig. 119). En supposant que tous les éléments qui composent la pile soient identiques, la force électromotrice totale est égale à la force électromotrice d'un élément multipliée par le nombre d'éléments qui entrent dans la série.

La résistance intérieure est égale à la résistance d'une série divisée par le nombre de celles-ci. Dans le cas de la figure, la force électromotrice est égale à trois fois celle d'un élément et la résistance intérieure est égale à trois fois celle d'un élément divisé par 2.

157. **Conditions du maximum de rendement.** — Supposons que nous ayons une pile de force électro motrice totale E et de résistance intérieure R. Elle fournira un courant d'intensité I.

L'énergie totale fournie par la pile, est $EI = W$ ... (1)

L'énergie dépensée pour vaincre la résistance intérieure est I^2R; par conséquent l'énergie utilisable est $W_u = W - I^2R = EI - I^2R$. . . . . (2).

de là on tire $W_u = RI\left(\frac{E}{R} - I\right)$ . . . . . (3).

Le rendement α est le rapport de l'énergie utile à l'énergie totale.

$$\alpha = \frac{W_u}{W} = 1 - \frac{IR}{E} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4).$$

Nous voyons que si la pile fournit un courant faible I étant petit, α est très voisin de 1 mais W_u est également très petit pour $I = \frac{E}{R}$ $\alpha = 1$, mais $W_u = o$; quand $I = \frac{E}{R}$ c'est que la pile travaille sur elle-même, elle est en court circuit; c'est-à-dire qu'il n'y a pas de conducteur entre les pôles.

Dans la formule (3) $W_u = IR\left(\frac{E}{R} - I\right)$ . . . . . (3).

W_u obtient sa plus grande valeur pour $I = \frac{E}{2R}$ ... (5).

C'est-à-dire pour un circuit dans lequel la résistance extérieure à la pile est égale à la résistance intérieure; en portant cette valeur (I) dans (3) on obtient

$$W_u = \frac{E^2}{4R} \ldots\ldots\ldots\ldots (6).$$

De (4) on tire pour cette valeur de W_u. — $\alpha = \frac{1}{2}$.

Donc lorsqu'une pile fournit la plus grande somme de travail extérieur qu'elle peut fournir le rendement est de 50 p. 100.

Généralement on fait en sorte que le rendement soit supérieur à 50 p. 100, il faut pour cela que $I < \frac{E}{2R}$, par conséquent que la résistance extérieure soit supérieure à la résistance intérieure.

Prenons un exemple. Supposons que nous ayons une pile d'un certain nombre d'éléments ayant ensemble une force électromotrice de 25 Volts et une résistance intérieure de 15 Ohms.

Si nous mettons la pile en court circuit, c'est-à-dire si nous réunissons par un conducteur sans résistance le pôle positif du dernier élément au pôle négatif du premier, nous avons :

$$\text{Intensité du courant } I = \frac{25}{15} = 1{,}67 \text{ Amp.}$$

$W = 25 \times 1.67 = 41.75$ Watts $W_u = 0$ rendement $= 0$.

Prenons une résistance extérieure $= 5$ ohms.

$$I = \frac{25}{15+5} = 1{,}25 \text{ Amp.}$$

$$W = 25 \times 125 = 31{,}25 \text{ Watts.}$$

$$W_u = 7{,}8 \text{ Watts.}$$

Rendement $\frac{W_u}{W} = \frac{7.8}{31.25} = \underline{25\ \%}$.

Pour une résistance extérieure égale à la résistance intérieure.

$$I = \frac{25}{15+15} = 0{,}833 \text{ Amp.}$$

$$W = 25 \times 9{,}833 = 20{,}825 \text{ Watts.}$$

$$W_u = I^2R = 0{,}833^2 \times 15 = \underline{10{,}2125} \text{ Watts.}$$

$$\frac{W_u}{W} = 50\ \%.$$

Pour une résistance extérieure de 30 ohms.

$$I = \frac{25}{15+30} = 0{,}56 \quad W = 14 \text{ Watts} \quad W_u = 9{,}42 \text{ W}$$

$$\frac{W_u}{W} = \underline{67\ \%}.$$

On peut voir par là qu'un certain nombre d'éléments de pile fournissent le plus grand travail qu'ils peuvent donner quand la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure. Quand la résistance extérieure augmente, le rendement p. 100 augmente également, mais le travail fourni est plus petit.

Il ne faut pas confondre les conditions de travail maximum avec le rendement p. 100 maximum.

Remarque. — Le travail total fourni pendant l'unité de temps par une pile donnant un certain courant, est égal au produit de sa force électromotrice par l'intensité du courant.

Le travail dans le circuit extérieur dans le même temps est égal au produit de l'intensité par la force électromotrice nécessaire pour faire circuler à travers la résistance extérieure le courant produit ; le travail extérieur en Watts par seconde est donc égal (130) au produit de la force électromotrice à circuit fermé par l'intensité.

Le rendement est donné par le rapport

$$\frac{W_0}{W} = \frac{\text{Force électromotrice à circuit fermé} \times \text{Intensité.}}{\text{Force électromotrice à circuit ouvert} \times \text{Intensité.}}$$

Le rendement est donc égal au rapport de la force électromotrice à circuit fermé, à la force électromotrice à circuit ouvert.

158. **Consommation des constituants dans une pile.** — Supposons une pile de n éléments ayant chacun une force électromotrice e. Le travail total fourni par la pile dans un temps t est :

$$W = ne\,I\,t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1).$$

Soit a le travail chimique, c'est-à-dire le nombre d'équivalents décomposés dans chaque élément par 1″ pour une intensité de courant de 1 Ampère. Le tra-

vail dans la pile complète et pour le courant I sera

$$A = na\,I\,t \ldots\ldots\ldots\ldots (2).$$

De (1) et (2) on tire $W = e\frac{A}{a}$ Watts.

Ou $C = \frac{e}{75 \times 9.81} \cdot \frac{A}{a}$ chevaux vapeur.

Pour un cheval-vapeur, on a :

$$\frac{e}{75 \times 9.81} \cdot \frac{A}{a} = 1$$

d'où $$A = \frac{75 \times 9.81}{e}\,a = \frac{736}{e}\,a \text{ par } 1''. \ldots (3).$$

L'expression (3) nous donne la quantité d'équivalents chimiques consommés dans la pile par 1″ pour produire un cheval-vapeur. La dépense par heure sera 3,600 fois plus grande.

Soit Z le poids de zinc à dépenser par heure pour produire un cheval-vapeur; l'équivalent du zinc étant 1,2133.

$$Z = \frac{736 \times 1{,}2133}{e} \text{ grammes.} = \frac{893}{e} \text{ grammes} \ldots (4).$$

Nous allons calculer la dépense pour un élément Bunzen et pour un élément Daniell en nous mettant dans les conditions du travail maximum et du rendement de 50 p. 100.

1° *Pile Daniell.* — Force électromotrice 1,08 volt, résistance intér. 2,5 ohms (modèle de grandes dimensions).

Dépense en zinc d'après (4) $\frac{893}{e}$ gr. à 0,50 le kilog.

785 gr.. . . . . fr. 0.39

Sulfate de Cu il en faut 4 fois le poids du zinc à 1 fr. le kilog. . . . . » 3.15

$Zn + H^2So^4 = Zn\,So^4 + H^2 \quad H^2 + Cu\,So^4 = H\,So_4 + Cu.$

Acide sulfurique, il faut compter sur le double de la consommation théorique à 0,15 le kil.	» 0.30
	fr. 3.84

Comme le rendement est de 50 p. 100, le cheval-vapeur coûtera 7,68 par heure.

2° *Pile Bunzen.* — Force électromotrice 1,8 volt.

Zinc. $\frac{893}{1.8} = 496$ gr. à 0.50 le kilog. . . .	fr. 0.25
Acide sulfurique moitié moins environ que l'élément précédent puisque l'on consomme moins de zinc.	» 0.15
Acide nitrique	» 0.50
	fr. 0.90

Le rendement étant de 50 p. 100; la dépense par cheval heure serait de 1 fr. 80.

Il ne faut pas oublier que ce sont là des chiffres théoriques, en pratique la dépense serait plus grande à cause du déchet.

Cette comparaison montre pourquoi l'on fait usage des piles Bunzen, malgré tous leurs inconvénients, au lieu des éléments à sulfate de cuivre.

159. **Problèmes.** — Quel est le plus petit nombre d'éléments Callaud, type Gravity, de 1 volt de force électro-motrice et 1 ohm de résistance intérieure qu'il faudrait employer pour produire un courant de 5 Ampères dans un circuit dont la résistance est de 1,14 ohm.

Pour faire circuler 5 Ampères à travers un circuit de 1,14 ohm de résistance, il faut une force électromotrice donnée par la formule $I = \frac{E}{R}$ $E = 5,7$ volts.

Il faut donc 6 éléments en tension, ce que nous donnera 6 Volts.

La résistance intérieure des éléments doit être égale à 1,14 ohm, il faudra donc mettre en quantité un nombre x de séries tel que $\frac{6}{x} = 1.14 \quad x = 5,2$ soit 6 séries de 6 éléments ou en tout 36 éléments.

II. Quel est le plus petit nombre d'éléments Bunzen que l'on pourra employer pour faire fonctionner une lampe à incandescence demandant un courant de 0.95 d'Ampère et une force électromotrice de 65 Volts, les éléments de pile employés ayant 1,8 volts de force électromotrice et une résistance intérieure de 0.1 d'ohm.

La résistance de la lampe sera d'après la loi d'Ohm :

$$R = \frac{65}{0.95} = 68.4 \text{ ohms.}$$

Il faut que la pile donne aux bornes une force électromotrice de 65 volts.

Si n est le nombre d'éléments, on a :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{force électromotr. de la pile.}}{\text{résist. de la pile} \times \text{Résist. de la lampe}}$$

n étant le nombre d'éléments en série, nous avons :

$$0.95 = \frac{n.\ 1.8}{n \times 0,1 + 68.4} \text{ d'où } n = \text{entre 37 et 38 éléments.}$$

On emploiera 38 éléments.

Travail tot. dans le circ. $= W = 38 \times 1.8 \times 0.95 = 64,98^{w}$

Travail utile $W_1 = 65 \times 0.95 = 61,75$ Watts par 1".

Rendement

$$\frac{W_1}{W} = \frac{68,4 \times 0,95}{65 \times 0,95} = \frac{\text{Force électromot. à circ. ouv.}}{\text{Force électrom. à circ. fermé}} = 98,4\%.$$

III. Trouver l'intensité du courant produit par une pile dans les conditions suivantes : (fig. 120). La pile se

compose de 2 séries de 50 éléments Daniell de 1 volt de force électromotrice et de 2,5 ohms de résistance intérieure; le circuit extérieur est complexe et comprend de *a* jusque *b*, 500 ohms de résistance, de *b* en *c* deux conducteurs dérivés de chacun 250 ohms; de *c* en *d* 50 ohms de *d* en *c*, 1° un conducteur de 1200 ohms sur lequel est placé en dérivation un circuit qui lui-même se bifurque, la résistance de *d* à *f* est de 0.7 d'ohm, de *g* à *e* de 0.5 entre *f* et *g* se trouvent deux conducteurs placés en dérivation ayant respectivement 5 et 5000 ohms de résistance; enfin de *e* en *h* il y a 10 ohms.

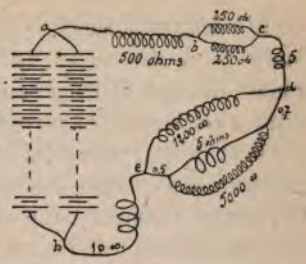


Fig. 120.

Force électromotrice de la pile 50 volts.

Résistance intérieure $\frac{50 \times 2.5}{2} = 62,5$ ohms . 62.5

Résistance de *a* en *b*, 500 . . . . . 500.0

La résistance de *b* en *c* peut être remplacée par une autre (75) de 125.0

Résistance de *c* en *d* 5.0

Résistance de *f* en *g* $\frac{5000 \times 5}{5005} = 4.995$

$+ 0.5$

$+ 0.7$

6.195

Résistance *d e* $= \frac{1200 \times 6,195}{1206,195}$ 6.015

Résistance totale . . 698.515

$$\text{Intensité} = \frac{50}{698,515} = 0.070. \text{ Soit 70 milliampères.}$$

160. **Piles secondaires.** — Nous avons montré l'expérience de la pile à gaz (fig. 95), dans laquelle la combinaison des gaz hydrogène et oxygène donne lieu à un courant électrique, l'hydrogène formant le pôle positif de la pile et l'oxygène le pôle négatif. C'est là un moyen de transformer l'énergie électrique en énergie chimique, et de dépenser ensuite cette énergie chimique pour reproduire de nouveau de l'énergie électrique.

L'appareil ainsi formé constitue une pile secondaire ou accumulateur.

Nous reporterons l'étude de ces appareils après les chapitres traitant de l'induction et des machines dynamo-électriques.

PILES THERMOÉLECTRIQUES.

161. — En 1821, Seebeck découvrit que si l'on soudait par les extrémités une lame de cuivre à une lame de bismuth, et si l'on échauffait l'une des soudures en maintenant l'autre à une température constante, le système était parcouru par un courant; et que si l'on place entre la lame de cuivre et la lame de bismuth (fig. 121) une aiguille aimantée bien suspendue, l'aiguille est fortement déviée lorsque l'on échauffe l'une des soudures.

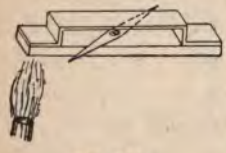


Fig. 121.

Lorsque deux métaux différents sont en contact, une

élévation de température crée donc une différence de potentiel.

Cette différence de potentiel dépend 1° *de la différence des températures de la soudure chaude et de la soudure froide lorsque l'on ne considère que deux métaux ;* 2° *elle dépend de la nature des métaux en contact.*

La différence de potentiel créée est très faible ; ainsi avec un couple cuivre bismuth, pour une élévation de température de 100°, la différence de potentiel n'est que de 0,01 de volt.

Pour obtenir des forces électromotrices un peu importantes, il faut accoupler un grand nombre d'éléments en tension et les disposer en zigzag (fig. 122). On chauffe toutes les soudures de rang impair par exemple et on laisse froides les soudures de rang pair.

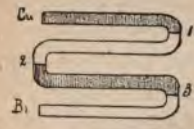


Fig. 122.

C'est la disposition employée par Melloni et Nobili, pour la pile qui leur a servi à l'étude du rayonnement et de la transmission de la chaleur.

162. **Pile de Clamond.** — C'est pour ainsi dire la seule pile thermo-électrique employée aujourd'hui ; elle est composée de couples formés d'un alliage de zinc et d'antimoine ou de bismuth et d'antimoine et de fer (fig. 123). Les éléments sont disposés en couronne, tous les éléments sont réunis en tension. On empile un certain nombre de couronnes placées les unes au-dessus des autres, et on réunit toutes les couronnes elles-mêmes en tension. Les soudures centrales sont chauffées par un petit foyer à coke ou à gaz, les soudures exté-

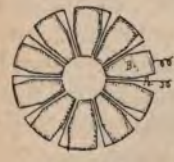


Fig. 123.

rieures sont refroidies par le contact de l'air ambiant.

Une pile de ce genre, présentée par MM. Lantsack, Lask et Kohn, de Vienne, et essayée par le comité des Essai de l'exposition d'Anvers, a donné les résultats suivants :

Pile de 1,280 éléments, pesant en tout 164 kilogr., chauffée au moyen de coke.

Tous les éléments étant accouplés en tension.

Force électromotrice 28,6 volts ; résistance intérieure 42 ohms.

Un modèle plus petit formé de 11 couronnes de 13 éléments chacun, soit 143 éléments pesant en tout 23 kil. 500 gr. a donné pour une consommation de 437 litres de gaz à l'heure, une force électromotrice de 3,16 volts et une résistance intérieure de 5,45 ohms.

Les piles thermo-électriques peuvent convenir pour donner des courants d'intensité constante lorsque l'on n'a besoin que d'une faible force électromotrice. Elles sont très utiles dans les laboratoires pour les dépôts électrolytiques, et pour faire fonctionner de petits bains galvanoplastiques d'une façon intermittente.

CHAPITRE XII

GALVANOMÈTRES

163. — Au chapitre traitant de l'électro-magnétisme (95), nous avons dit que l'on donne le nom de *galvanomètres* à des appareils qui servent à déceler le passage et à mesurer l'intensité des courants électriques par l'action que ceux-ci produisent sur l'aiguille aimantée.

Si nous considérons (fig. 124) un cadre galvanomé-

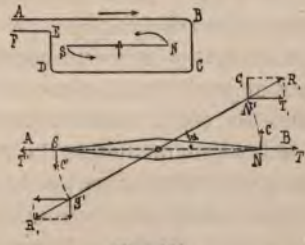


Fig. 124.

trique ABCDEF, placé dans la direction du méridien magnétique, l'aiguille aimantée NS sera en équilibre dans cette direction également; mais dès que nous enverrons un courant dans le conducteur, l'aiguille aimantée sera soumise à deux actions directrices, l'une provenant de la terre et agissant parallèlement à AB, l'autre déterminée par le courant et dont la direction est perpendiculaire à la première (87).

Si (NT ST') et (NC SC'), représentent respectivement les intensités des champs magnétiques terrestre et du

courant, l'aiguille aimantée sera déplacée de sa position d'équilibre primitive, jusqu'à une certaine position $N'S'$ pour laquelle la résultante $N'R_1$ des actions $N'T_1$ et $N'C_1$ soit dirigée suivant $N'S'$.

On voit par là que l'angle de déviation α sera d'autant plus considérable que le moment des forces $(N'C_1, S'C_1')$ sera plus grand par rapport à celui de $(N'T_1, S'T'_1)$. L'on doit donc faire en sorte que dans chaque cas, le champ magnétique du courant ait une intensité en rapport avec celle du champ terrestre.

Si l'on doit mesurer des courants de haute intensité, NC devient grand par rapport à NT, il faut alors employer des galvanomètres dont le cadre est composé d'un petit nombre de conducteurs très gros.

Si au contraire on doit mesurer des courants d'intensité très faible, il faut augmenter la valeur de NC en multipliant le nombre de tours du fil autour de l'aiguille aimantée ; seulement l'augmentation du nombre de tours sur le cadre a pour effet d'accroître la résistance de celui-ci et par conséquent de diminuer l'intensité du courant. Il y a donc une limite à conserver car, au-delà d'une certaine résistance, l'augmentation du champ magnétique du cadre provenant de l'augmentation du nombre de tours du multiplicateur ne compenserait pas la diminution résultant de l'accroissement de résistance.

164. **Conditions d'emploi des galvanomètres à haute résistance et à faible résistance.** — La résistance du galvanomètre à employer doit être en rapport avec celle du circuit dans lequel il doit être intercalé.

Pour un circuit de faible résistance il faut employer des galvanomètres à fil gros et court. Il est facile de comprendre que si nous avons un circuit de petite résistance,

nous obtiendrons une déviation plus grande en employant un galvanomètre de petite résistance. Si nous avons un circuit de 1 ohm de résistance, si nous intercalons un galvanomètre de 0,1 d'ohm, l'intensité sera réduite dans le rapport de $\frac{1,1}{1}$, tandis qu'un galvanomètre de 5000 ohms réduirait le courant dans le rapport de $\frac{1}{5001}$.

Quand on a affaire à des résistances très considérables, 1 migohm par exemple, si l'on fait usage d'un galvanomètre de 5000 ohms, l'intensité du courant ne sera réduite que dans le rapport de $\frac{1000000}{1005000}$ ou de 0,005.

Pour les circuits de haute résistance, il est donc avantageux d'employer des galvanomètres dont le fil fait un grand nombre de tours.

165. **Aimant compensateur.** — Pour un galvanomètre déterminé et pour un même courant, la déviation sera d'autant plus grande que l'intensité de magnétisme terrestre sera plus faible, c'est-à-dire que la force directrice sera plus petite. On peut agir sur la force directrice au moyen d'un aimant A (fig. 125), appelé *aimant compensateur*, *correcteur* ou *directeur*. Si l'on oriente cet aimant de façon que son champ soit de sens contraire à celui de la terre, c'est la différence des deux qui agira sur l'aiguille. Si les deux champs étaient égaux et de signe contraire, il n'y aurait plus de force directrice, l'aiguille aimantée dévierait de 90° pour tout courant quelque faible qu'il fût, passant à travers le conducteur.

Fig. 125.

166. **Aiguilles astatiques.** — L'action du champ magnétique terrestre peut être diminuée autant qu'on le veut par l'emploi d'un système d'aiguilles astatiques (58), (100). Le système magnétique ne peut pas être tout à fait astatique, parce que s'il en était ainsi, les aiguilles seraient en équilibre dans toutes les positions sous l'action de la terre, le galvanomètre serait dans les conditions d'une balance folle, c'est-à-dire d'une balance dont le centre de gravité du fléau coïncide avec l'axe de suspension; une balance ainsi construite n'a pas de force directrice.

167. **Galvanomètre de Nobili.** — Ce galvanomètre était autrefois le plus répandu dans les laboratoires. Il se compose (fig. 126) d'un système magnétique formé de deux aiguilles astatiques de 5 à 6 centimètres de longueur; l'aiguille inférieure est entourée du cadre galvanométrique.

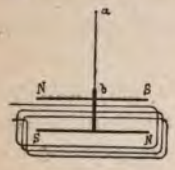


Fig. 126.

Les aiguilles aimantées sont suspendues par un fil de cocon *ab* sans torsion. Cette suspension offre beaucoup moins de résistance au mouvement que les pivots même munis de châpes en agathe ou en rubis; aussi on emploie toujours les suspensions en fibre de cocon pour les appareils très sensibles.

168. **Galvanomètre Thomson** (fig. 127). — Dans cet appareil on a réuni toutes les conditions pour arriver au maximum de sensibilité.

Par l'emploi d'un aimant directeur on peut agir sur le champ magnétique de la terre. Cet aimant peut s'élever ou s'abaisser à volonté de façon à faire varier la sensibilité du galvanomètre d'après les besoins.

Le système astatique présente une construction toute

spéciale, il est formé non pas de 2 aiguilles, mais de deux systèmes de 4 à 5 petits barreaux aimantés A B de 5 à 6 millimètres de longueur. Ces deux systèmes sont réunis par une tige rigide en aluminium. Chacun des systèmes d'aiguilles est entouré d'une bobine circulaire, les deux multiplicateurs sont enroulés de façon qu'ils agissent tous les deux dans le même sens sur le système magnétique. Les aiguilles étant courtes, les spires des bobines sont très rapprochées des aimants, de sorte que la longueur du fil et par conséquent sa résistance est réduite à un minimum. On emploie plusieurs petits barreaux aimantés parce que la somme de leurs moments magnétiques est égale au moment magnétique d'une aiguille simple qui aurait une longueur beaucoup plus grande.

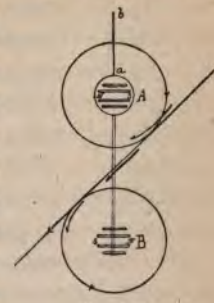


Fig. 127.

Les aiguilles aimantées sont suspendues par un fil de cocon. Enfin, comme les aiguilles sont trop courtes pour que la lecture des déviations soit possible, on emploie un artifice sur lequel nous reviendrons plus loin.

169. **Galvanomètre différentiel.** — Si l'on enroulait en même temps sur le cadre d'un galvanomètre deux fils identiques, en faisant parcourir ces deux fils par des courants de même sens, les actions s'ajouteraient ; si au contraire les courants étaient de sens contraires, les champs magnétiques produits se retrancheraient.

Au lieu d'enrouler les deux fils en même temps, on place le système magnétique symétriquement par rapport à deux cadres galvanométriques identiques (fig. 128)

ABEF, A'B'E'F', que l'on fait parcourir par des courants de sens contraires. On peut ainsi comparer deux courants dont l'un est connu, l'instrument donnant la différence de leurs actions sur l'aiguille aimantée.

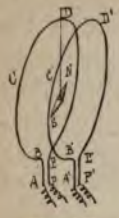


Fig. 128.

Tous les genres de galvanomètres peuvent être construits d'après le système différentiel.

170. **Galvanomètre Deprez d'Arsonval.** — Cet appareil diffère notablement des systèmes que nous venons de décrire. Il se compose (fig. 129) d'un cadre galvanométrique A, suspendu entre deux fils d'argent *ab* et *cd* qui servent à l'entrée et à la sortie du courant, ces fils sont en communication avec les bornes d'attache C et D. Le cadre peut osciller entre les pôles d'un puissant aimant permanent en fer à cheval E; le cylindre en fer doux B placé à l'intérieur du cadre, sert à concentrer les lignes de force du champ magnétique.

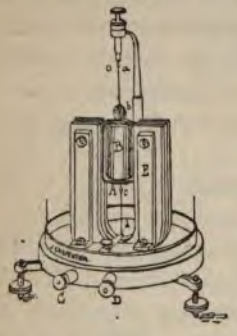


Fig. 129.

Quand le cadre est traversé par un courant, il tend à se mettre en croix avec les lignes de force du champ de l'aimant permanent, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre le moment de rotation provenant de l'action réciproque du champ de l'aimant permanent sur le champ magnétique du cadre, et la torsion du fil d'argent qui constitue la force directrice. Dans les autres galvanomètres, la force directrice est constituée soit par le magnétisme terrestre soit par un aimant compensateur.

Le galvanomètre que nous venons de décrire présente l'avantage d'être *apériodique*, c'est-à-dire d'avoir une période d'oscillation nulle ou très courte et d'arriver ainsi rapidement à sa position d'équilibre, alors que dans les galvanomètres à aiguille suspendue par un fil de soie ou sur pivot, l'aiguille ne s'arrête qu'après une série d'oscillations qui dure d'autant plus longtemps que l'appareil est plus sensible (1).

171. — Pour la plupart des mesures que l'on doit faire dans un laboratoire industriel, telles que mesures de résistances, étalonnages d'Ampèremètres, de Voltmètres, mesure de force électromotrice de piles, le galvanomètre Deprez d'Arsonval avec cadre de 250 ohms de résistance est d'un usage très commode. Il ne convient pas pour être placé dans un circuit de haute résistance où se trouve une pile qui se polarise ou une résistance très variable, parce que dans ces conditions il perd sa propriété d'être apériodique. Il faut alors faire usage d'un galvanomètre Thomson.

(1) La propriété du galvanomètre Deprez d'Arsonval d'être apériodique provient de la cause suivante : Le galvanomètre étant en court circuit, c'est-à-dire les bornes C et D étant réunies par une faible résistance, si l'on fait osciller le cadre, celui-ci se mouvant dans un champ magnétique puissant devient le siège de courants induits qui ont pour effet de s'opposer à son mouvement, le cadre s'arrête comme s'il rencontrait une résistance à son mouvement de la part d'un milieu visqueux. Lorsque le circuit dans lequel le galvanomètre est placé présente une grande résistance, l'intensité des courants induits est diminuée et par conséquent l'amortissement des oscillations ne se produit plus aussi complètement.

On peut rendre les galvanomètres à aiguilles aimantées plus ou moins opériodiques, pour cela, on entoure le système magnétique d'une masse en cuivre rouge, l'aiguille aimantée en oscillant détermine dans cette masse métallique des courants induits qui tendent à arrêter son mouvement, ainsi que nous le verrons plus loin. Cette adjonction ne change rien à la sensibilité de l'appareil.

Dans les galvanomètres de Thomson on se contente de placer une palette en albuminium sur la tige qui réunit les aiguilles formant le système astatique. La résistance de l'air arrête plus ou moins les oscillations. Quelquefois on fait mouvoir cette palette dans de la glycérine.

Pour les essais ordinaires à faire sur les lignes télégragraphiques et téléphoniques ainsi que nous le verrons, on peut employer un galvanomètre différentiel avec système astatique ou non suspendu sur pivot, mais il faut toujours employer des châpes en agate ou en rubis; les châpes en acier présenteut trop vite des traces d'usure d'où il résulte un frottement qui diminue considérablement la sensibilité.

172. **Erreur de lecture due à la parallaxe.** — Soit P (fig. 130) la projection de la pointe de l'aiguille et MN celle du cadran sur un plan perpendiculaire à celui-ci, comme l'aiguille ne touche pas le cadran, suivant que le rayon visuel aura la direction AP, A_1P ou A_2P, on lira la division *a*, *b* ou *c* du cadran; on est donc exposé à faire une erreur de lecture *ab* ou *ac* est plus ou en moins, erreur qui peut être assez considérable.

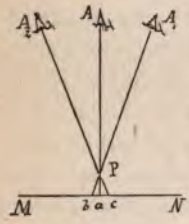


Fig. 130.

Il y a un moyen simple de l'éviter totalement, c'est de tracter les divisions sur un miroir; lorsque l'aiguille viendra se superposer à son image, c'est que le rayon visuel sera dans le plan perpendiculaire au cadran passant par P. Cet artifice très simple est souvent employé par les constructeurs anglais, il serait à souhaiter qu'il fût d'un usage général.

173. **Lecture des déviations au moyen du miroir.** — Afin de rendre appréciables à l'œil de faibles déviations, on est conduit à allonger les aiguilles aimantées au moyen d'index en laiton, en bois ou en aluminium. Ces index alourdissent et augmentent l'inertie des systèmes mobiles et diminuent la sensibilité des appareils.

Pour obvier à cet inconvénient dans les galvanomètres sensibles, on emploie un artifice qui a pour effet d'indiquer un angle de déviation double de celui de l'aiguille aimantée, et de donner un index sans poids aussi long qu'on le veut.

Voici en quoi il consiste : au système mobile, aiguilles astatiques ou cadre galvanométrique (fig. 129 *b*) on attache un petit miroir *ab* (fig. 131). A une certaine distance,

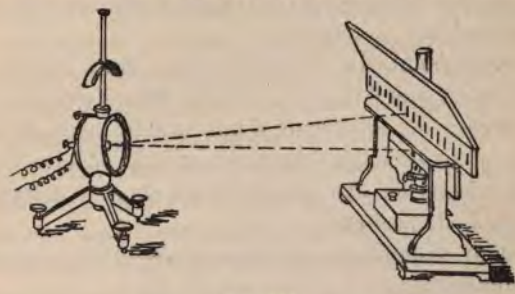


Fig. 131.

généralement 1 mètre, on place l'échelle AB sur laquelle se lisent les déviations.

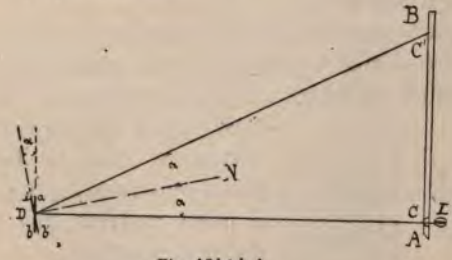


Fig. 131 *bis*.

Derrière l'échelle en L se trouve une source lumineuse,

(lampe à pétrole, à gaz ou électrique) qui envoie ses rayons sur le miroir par une fente C pratiquée dans l'échelle. Tant que le miroir est au repos, dans la position *ab*, les rayons lumineux sont réfléchis suivant DC. Mais si le système mobile dévie d'un angle α, *ab* vient en $a'b'$, l'image de C est réfléchie en C' et il est facile de voir que l'angle $CDC' = 2\alpha$, les rayons incidents CD et les rayons réfléchis DC' faisant avec la normale DN au miroir le même angle α.

L'index est constitué par un rayon lumineux sans poids et sans inertie.

L'inconvénient du dispositif que nous venons de décrire, c'est que l'on doit opérer dans l'obscurité; on peut l'éviter en se servant d'une lunette avec réticule, dont l'axe de visée est perpendiculaire à l'échelle AB. La lunette permet de lire par réflexion dans le miroir les divisions C' de l'échelle.

Ces deux dispositions ne peuvent s'employer que dans un laboratoire.

174. **Shunts. — Réducteurs.** — On peut faire varier à volonté la sensibilité d'un galvanomètre, de façon à pouvoir l'employer pour la mesure de courants d'intensités très différentes.

Lorsque le courant que l'on emploie est assez intense pour faire dévier le galvanomètre au-delà des limites convenables, on dérive une partie du courant (fig. 132) à travers une bobine S placée en dérivation entre les bornes du galvanomètre de façon que celui-ci n'est traversé que par une partie du courant.

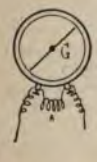


Fig. 132.

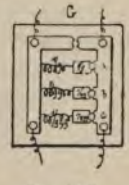


Fig. 133.

Ces bobines de résistance s'appellent *shunts* ou *réducteurs*.

Généralement les galvanomètres sont accompagnés d'une boîte (fig. 133) contenant trois bobines ayant respectivement 1/9, 1/99 et 1/999 de la résistance du multiplicateur. Ces résistances peuvent être placées en dérivation en insérant un bouchon dans l'un des trois trous *a*, *b* ou *c*.

Quand on place le bouchon en *a*, $S = \frac{1}{9}$ G et le courant dans G = 0.1 de l'intensité totale (77). Lorsque l'on place le bouchon en *b* ou *c*, le galvanomètre est traversé par la 1/100 où la 1/1000e partie du courant total.

Le même galvanomètre peut donc servir pour mesurer des courants dont les intensités varient de 1 à 1000.

Si par exemple nous avons un galvanomètre qui donne une déviation de 30 divisions avec un élément Daniell et une résistance de 10 megohms, c'est-à-dire un courant de 0,0000001 Amp. pour obtenir la même déviation avec un courant de 0,0001 Amp., il faut employer le shunt 1/999,

---

CHAPITRE XIII

MESURE DES INTENSITÉS

175. — L'intensité d'un courant électrique ne peut se mesurer que par des moyens détournés, on ne peut pas procéder à la mesure de la quantité d'électricité que débite un conducteur, comme on mesure le débit d'une conduite d'eau.

Pour évaluer l'intensité d'un courant en unités absolues, en Ampères, on se base sur les effets mécaniques ou chimiques qui sont déterminés par le conducteur, et de l'évaluation des effets produits on déduit la valeur de l'intensité, en faisant usage des lois que nous avons exposées.

Les diverses méthodes à employer se ramènent toutes à trois genres d'observations, savoir :

1° Mesurer la quantité d'un composé chimique que le courant décompose pendant un temps donné.

2° Évaluer l'intensité du champ magnétique produit par le courant, en déterminant son action soit sur une aiguille aimantée, soit sur un morceau de fer doux.

3° Évaluer la grandeur de l'action exercée par un courant fixe sur un courant mobile.

Les appareils employés pour mesurer les intensités des courants se nomment des *Ampèremètres*.

176. **Mesure de l'intensité d'un courant par son action chimique.** — Nous avons vu (81) que Faraday a établi que, lorsqu'un courant traverse un composé chimique, le poids de composant mis en liberté pendant l'unité de temps, est pro-

portionnel à la quantité d'électricité qui a passé pendant ce temps et par conséquent à l'intensité du courant.

Si un courant constant traverse une solution de sulfate de cuivre, par exemple, le poids de cuivre qui se déposera sur l'électrode négative du Voltamètre nous permettra de calculer l'intensité.

On a trouvé par expérience, que un coulomb par seconde, ce qui constitue un courant d'un ampère d'intensité dépose 0 gr. 00032709 de cuivre soit 1 gr. 177 par ampère et par heure.

Étant donné un courant constant dont on veut mesurer l'intensité, si l'on intercale dans le circuit un voltamètre à sulfate de cuivre dont les électrodes sont formées par des lames de platine, le cuivre métallique va se déposer sur l'une de ces lames, elle augmentera donc de poids.

Pour obtenir l'intensité du courant en ampères, il suffira de diviser l'augmentation du poids en grammes par le nombre de secondes et par 0,00032709 *équivalent électrochimique du cuivre*

Il faut employer une solution saturée de sulfate de cuivre additionnée de 5 p. 100 d'acide sulfurique pour la rendre plus conductrice. La surface des électrodes devra être suffisante pour que l'intensité du courant ne dépasse pas 3 ampères par décimètre carré, si l'on dépassait cette limite, le dépôt de cuivre ne serait pas adhérent et une partie tombant au fond du voltamètre échapperait à la pesée.

177. **Exemple.** — Le courant ayant passé pendant 4 h. 25′ 30″, la lame négative du voltamètre a augmenté de 22 gr. 365, quelle a été l'intensité du courant?

La durée de l'expérience ayant été de 15930″.

$$\text{Intensité} = \frac{22,365}{0,00032709 \times 15930} = 4,29 \text{ Ampères.}$$

Ou bien comme l'ampère-heure dépose 1 gr. 177 de cuivre.

$$\text{Intensité} = \frac{22,365}{1,177 \times 4,425} = 4,29 \text{ Ampères.}$$

Cette méthode est très commode pour le tarage direct des appareils de mesure; la durée de l'expérience dépend de la précision que l'on veut obtenir, les erreurs relatives étant d'autant moindres que le dépôt est plus considérable. Dans la pratique courante, une durée de demi-heure suffit pour l'expérience.

Le compteur d'électricité d'Edison est basé sur l'emploi d'un voltamètre à sulfate de zinc.

178. **Mesure de l'intensité des courants par leur action sur l'aiguille aimantée. Boussole des tangentes.** — Soit ABC (fig. 134), un conducteur circulaire placé dans le plan du méridien magnétique, et au centre duquel nous suspendons un petit aimant *ab*; donnons à cet aimant des dimensions assez petites pour que sa longueur puisse être négligée par rapport au diamètre *d* du courant; prenons par exemple *d* égal à 20 fois la longueur de l'aiguille; dans ces conditions, celle-ci oscillera dans une portion uniforme du champ magnétique produit par le courant (fig. 134). *Nous avons vu* (96) *que le champ magnétique a une intensité directement proportionnelle à celle du courant qui le pro-*

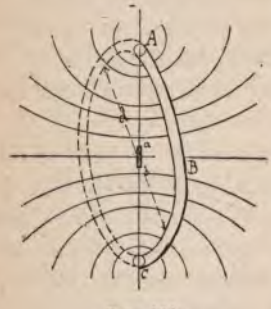


Fig. 134.

duit. Lorsque le conducteur sera traversé par un courant, l'aiguille aimantée sera déviée de sa position d'un certain angle d'autant plus grand que l'intensité du courant sera plus considérable.

Voyons quelle est la relation qui existe entre l'*intensité du courant et l'angle dont dévie l'aiguille aimantée*. L'action directrice de la terre sur l'un des pôles de l'aiguille est constante et peut être représentée par une longueur OB (fig. 135). Le courant étant dans le plan du méridien magnétique produira un champ dont les lignes de force agissant sur l'aiguille seront perpendiculaires à celles du champ terrestre, l'action du courant sur l'un des pôles de l'aiguille peut donc être représentée par une longueur OA perpendiculaire à OB; l'un des pôles de l'aiguille sera donc soumis à une force représentée en grandeur et en direction par CO résultante de OA et OB, et l'aiguille déviera d'un angle α.

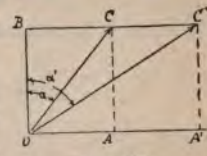


Fig. 135.

Si nous doublons l'intensité du courant qui parcourt le conducteur, son action directrice sur l'aiguille sera OA' = 2OA ; l'action de la terre étant constante, la résultante de OA' et OB est OC', et l'aiguille déviera de l'angle α'.

Pour une intensité double de celle qui a produit la déviation α, on obtient donc une déviation α' telle que l'aiguille si elle était prolongée intercepterait sur BD parallèles à OA, et une longueur BC' = 2 BC.

Pour une intensité triple, on aurait BC'' = 3 BC, etc. Or les longueurs BC, BC', BC'' etc., sont ce que l'on appelle en trigonométrie les tangentes des angles α, α', α'', etc.

Dans un appareil construit comme nous l'avons indiqué si nous connaissons l'intensité de courant qui cor-

respond à une déviation déterminée, nous pouvons obtenir les intensités pour toutes les déviations, puisque les intensités sont entre elles comme les tangentes des angles dont l'aiguille se meut. C'est pour cette raison qu'on appelle ces instruments *boussoles des tangentes*.

Pour éviter d'avoir à chercher dans une table la valeur de la tangente on trace la graduation du cadran de la façon suivante : Comme l'aiguille est très courte, on place un index perpendiculairement à celle-ci, de façon à rendre les déviations plus visibles. Avec un rayon égal à la demi-longueur de l'index, on trace un cercle (fig. 136).

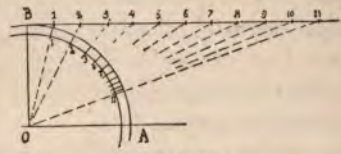


Fig. 136.

Soit AOB le quart de cette circonférence, on trace deux rayons OA et OB perpendiculaires l'un à l'autre, on mène du point B une parallèle à OA sur laquelle porte des longueurs égales; joignant les points de division 1. 2. 3..... au centre de la circonférence, les rayons rencontrent celle-ci en des points 1. 2. 3. 4..... tels que tg B02 = 2 tg B01, tg B03 = 3 tg B01, etc. Les divisions inégales, indiquées par l'appareil, correspondent donc à des intensités égales dans le conducteur.

On peut calculer directement à quelle intensité de courant correspond une division connaissant l'intensité du magnétisme terrestre, le moment magnétique de l'aiguille et les dimensions du cadre galvanométrique, mais dans la pratique on évalue l'intensité à laquelle corres-

pond une division soit par comparaison avec un voltamètre à sulfate de cuivre (176), soit par la méthode suivante :

On forme un circuit (fig. 137) comprenant la boussole G, une résistance R et une pile P constante, par exemple un étalon Daniell, modèle du Post-Office (154).

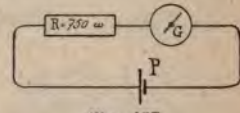


Fig. 137.

Si la résistance de G = 320 ohms, si R = 750 ohms et que le galvanomètre dévie de 25 divisions, on a :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Force électromotrice}}{\text{Résistance}} = \frac{1,07}{1070} = 0,001 \text{ Amp.}$$

1 division de l'échelle correspond donc à $\frac{1}{25}$ de milliampère.

179. **Déviation la plus convenable à employer pour la boussole des tangentes.** — Lorsque l'on fait usage du galvanomètre des tangentes, il faut employer un instrument tel que la déviation ne dépasse pas 45° pour les plus forts courants que l'on a à mesurer, parce que en vertu de la construction de l'échelle, au-delà de 45° les divisions deviennent très petites et les erreurs de lecture deviennent beaucoup plus sensibles.

180. **Ampèremètre de William Thomson pour les forts courants.** — Pour que la déviation de l'aiguille ne dépasse pas 45° dans un galvanomètre des tangentes, il faut que les intensités des champs magnétiques de la terre et du courant soient à peu près égales, à l'endroit où se trouve l'aiguille (178).

Il en résulte que pour mesurer des courants de haute intensité avec cet appareil, on doit augmenter considé-

rablement le diamètre du cadre, de façon que l'intensité du champ magnétique près de son centre, reste sensiblement égale à celle du champ terrestre pour les plus forts courants à mesurer. Il en résulte que les boussoles des tangentes pour forts courants sont loin d'être portatives.

Sir William Thomson a combiné une boussole des tangentes représentée par la fig. 138, dans laquelle cet inconvénient est supprimé.

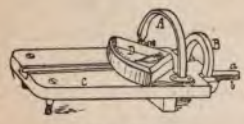


Fig. 138.

Au lieu d'employer comme champ constant le champ terrestre seul, on ajoute à celui-ci l'action d'un aimant permanent A demi-circulaire.

Le cadre de la boussole est formé par un ruban en cuivre rouge isolé, et enroulé de façon à former un anneau B d'environ 10 centimètres de diamètre, fixé à une table C. La boîte D renferme l'aimant mobile formé de quatre petits barreaux très courts réunis par une monture en aluminium portant un index du même métal qui se meut sur une échelle divisée comme l'indique la fig. 136.

On oriente l'appareil de façon que B soit dans le plan du méridien magnétique, une vis permet de déplacer A lentement jusqu'à ce que ses lignes de force coïncident avec celles du champ terrestre, ce que l'on constate lorsque l'index de l'appareil est au zéro de l'échelle. Le courant est amené par les lames *a* et *b* qui terminent le ruban formant le cadre.

Cet appareil permet de mesurer des courants d'intensités très différentes, parce que l'on peut glisser la boîte D sur la table C de façon à rapprocher ou à éloigner le système magnétique du cadre.

181. **Mesure de l'intensité des courants par l'action d'un solénoïde sur un morceau de fer doux. — Ampèremètre de Kohlrausch.** — Il se compose d'un solénoïde A, parcouru par le courant à mesurer (fig. 139), un morceau de fer doux F suspendu par un ressort R, en maillechort, porte un index qui se meut devant une échelle graduée E. La tension du ressort fait équilibre à l'action du solénoïde. Cet appareil doit être gradué par comparaison avec un autre instrument préalablement taré.

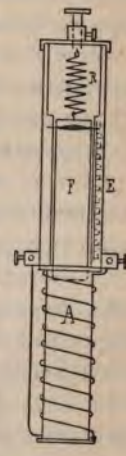


Fig. 139.

182. **Ampèremètre Ayrton et Perry.** — Cet appareil comme le précédent ne comprend pas d'aimant permanent. Il est basé sur le principe suivant : un petite masse de fer doux étant placée dans un champ magnétique non uniforme, sera toujours attirée du point où le champ est le moins intense vers celui où l'intensité magnétique est la plus grande.

A est une solénoïde parcouru par le courant à mesurer (fig. 140). Le champ de ce solénoïde est entouré par un tube en fer doux C, de façon à ne pas subir d'action magnétique extérieure.

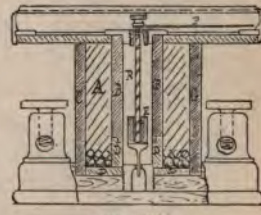


Fig. 140.

A l'intérieur de la bobine se trouve un tube en fer doux à sa partie supérieure B, et en laiton à la partie inférieure D.

Il en résulte que le champ magnétique créé à l'intérieur

du solénoïde est beaucoup plus intense vers le bas. Une petite masse de fer doux E est suspendue par un ressort R formé d'un mince ruban enroulé en hélice. Ce ressort est fixé à la partie supérieure, la masse E peut tourner, elle est simplement guidée. Lorsqu'un courant passe par la bobine A, la masse E est attirée vers le bas, le ressort s'allonge et se déroule légèrement, la masse E tourne d'un certain angle ; ce mouvement est rendu apparent par une tige fixée en E, passant dans l'axe du ressort et portant à sa partie supérieure un index F qui se meut sur un cadran.

La traction exercée sur le ressort et par conséquent le déplacement de l'index dépendent directement de l'intensité du courant.

183. **Ampèremètre de Hummel.** — Les appareils dans lesquels on fait usage d'aimants permanents doivent être souvent vérifiés à cause des variations que subit l'aimantation. Ceux dans lesquels les masses de fer doux sont importantes se dérèglent également à cause du magnétisme rémanent conservé par le fer.

Dans l'ampèremètre de Hummel qui est certainement le plus répandu dans l'industrie, les masses de fer et par conséquent le magnétisme rémanent sont réduits au minimum.

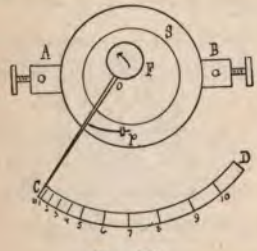


Fig. 141.

Cet ampèremètre se compose d'un solénoïde S dont le conducteur aboutit aux bornes A et B (fig. 141).

Un tube en fer doux très léger F, est porté par un axe O parallèle à celui du solé-

noïde; quand celui-ci est parcouru par un courant, F est attiré vers le conducteur le plus rapproché et son déplacement est indiqué par un index OC portant une petite masse P qui agit comme force directrice.

Le défaut de cet appareil est de ne pas être apériodique, son aiguille oscille continuellement pour les moindres variations dans l'intensité.

184. **Mesure de l'intensité par les actions réciproques des courants.** — Les méthodes et appareils que nous avons décrits jusqu'ici ne conviennent que pour la mesure des intensités des courants directs et continus.

Les appareils dans lesquels on évalue les actions réciproques de deux courants peuvent servir également pour la mesure des courants alternatifs.

On appelle *électro-dynamomètres*, les appareils qui servent à mesurer les intensités des courants en se basant sur les attractions ou répulsion réciproque de deux courants.

185. **Electrodynamomètre de Siemens.** — C'est le type classique des électro-dynamomètres pour forts courants. Il se compose d'un cadre fixe ABCD (fig. 142) et d'un cadre mobile DEF. Les deux extrémités de ce dernier plongent dans des godets C et D remplis de mercure qui établissent la continuité du circuit.

Fig. 142.

Le cadre fixe et le cadre mobile sont accouplés en tension, de telle sorte que le courant les parcourt successivement.

La force directrice est produite par un ressort à boudin *r*. Au moyen du bouton K, on produit une torsion sur ce ressort jusqu'à ce que l'aiguille soit revenue au

zéro, et on lit la torsion du ressort sur un cadran au moyen de l'index KL, au lieu de lire le déplacement du cadre. De cette façon, le système mobile et le système fixe restent toujours à la même distance l'un de l'autre, de sorte que la grandeur des actions des deux cadres ne dépend que de l'intensité du courant.

Quand le courant augmente d'intensité, il augmente à la fois dans le système fixe et dans le cadre mobile, il en résulte que la déviation varie comme *le carré de l'intensité*.

Si le sens du courant vient à changer, il change à la fois dans les deux cadres, et la direction des actions reste la même, le sens de la déviation ne change donc pas quel que soit celui du courant. *C'est pour cette raison que cet appareil peut servir à la mesure des courants alternatifs ce qui ne peut se faire avec les ampèremètres décrits jusqu'ici.*

L'électro-dynamomètre doit être taré au moyen d'un voltamètre à sulfate de cuivre.

186. **Balances électro-dynamiques de Sir William Thomson.** — Le maniement de l'électro-dynamomètre de Siemens est assez délicat, l'appareil est peu transportable à cause des godets remplis de mercure qui servent à établir les communications; le mercure s'oxyde petit à petit et peut donner lieu à un contact imparfait.

Les balances électro-dynamiques de Thomson sont basées sur le même principe que l'électro-dynamomètre, mais on y a remplacé le mercure par une communication métallique extrêmement flexible.

Deux bobines plates A et A' (fig. 143) parcourues par le courant, sont portées par un fléau de balance, le courant entrant par un côté du fléau en *a* et sortant par l'autre en *b*. A et A' oscillent entre quatre bobines paral-

lèles, BB′ et CC′ parcourues par le courant de telle façon que A soit attirée par C et repoussée par B, tandis que

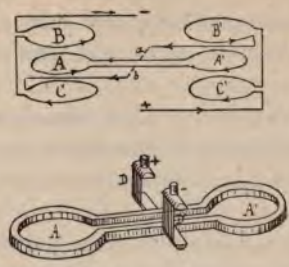


Fig. 143 et 144.

A′ est repoussée par C′ et attirée par B′ on rétablit l'horizontalité du fléau au moyen de poids qui donnent la grandeur de l'action mécanique exercée par le courant et d'où l'on peut déduire l'intensité en ampères.

Il est bien clair que le courant ne peut être amené par un contact aussi défectueux qu'un couteau de balance qui pour les grandes intensités du courant s'échaufferait et se détruirait immédiatement. On remplace les couteaux par des suspensions formées d'un grand nombre de fils de cuivre rouge très minces DD′ (fig. 144) placés l'un à côté de l'autre. Les fils étant minces (n° 60 B. W. G.) offrent une surface de refroidissement extrêmement considérable et peuvent par conséquent supporter une grande intensité de courant relativement à leur diamètre sans échauffement sensible.

On construit cinq types de ces balances :

La centi-amp.	balance	pour	mesurer de	1 à 50 centiamp.
deci-ampère	»	»	»	1 à 50 deciamp.
ampère	»	»	»	1/2 à 25 ampères.

deka-amp. balance pour mesurer de 2 à 100 ampères.
hecto-ampère » » » 10 à 500 »
kilo-ampère » » » 50 à 2500 »

Ces appareils ne peuvent guère être utilisés que par des personnes habiles, ce ne sont pas des instruments industriels (1).

187. **Méthode de Kittler.** — C'est une méthode de laboratoire très recommandable pour les essais qui demandent de la précision et pour le tarage des ampèremètres industriels.

Elle est basée sur l'emploi d'un galvanomètre G donnant des déviations proportionnelles aux intensités des courants qui le traversent. On peut employer pour cela soit un galvanomètre Deprez d'Arsonval à miroir, soit un galvanomètre Thomson, mais on doit faire en sorte que les déviations soient faibles pour que l'on puisse considérer les intensités comme étant proportionnelles aux déviations.

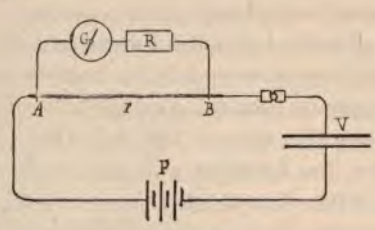


Fig. 145.

On place ce galvanomètre en dérivation entre deux points A et B du circuit et on intercale une résistance R

(1) Pour la description complète, voir Industries, mai 1888. *The Electrical Engineer de New-York*, mai 1888, ou le *Journal of the Society of Thelegraph-Engineers and Electricians*, nº 74, vol. XVII.

de façon à obtenir une déviation convenable pour les intensités que l'on a à mesurer. La résistance r comprise entre A et B doit être invariable.

1re opération. — Chercher à quelle intensité de courant correspond une certaine déviation du galvanomètre.

On forme un circuit (fig. 145), comprenant la résistance r un voltamètre V à sulfate de cuivre et une pile constante P donnant un courant d'intensité comparable à celle que l'on devra mesurer. On fait varier R de façon que la déviation reste dans les limites de l'échelle. Cette résistance une fois fixée reste invariable.

On pèse la lame négative en platine du voltamètre; celle-ci étant lavée avec de l'eau distillée, ensuite à l'alcool et à l'éther et on la sèche entre des papiers à filtre. Il faut éviter de toucher avec les doigts l'endroit où doit se faire le dépôt de cuivre, parce que le métal n'adhérerait pas.

On ferme le courant pendant une demi-heure et on note la déviation du galvanomètre de minute en minute pour s'assurer qu'elle est bien constante.

2e opération. — La demi-heure écoulée on interrompt le courant, on retire la lame du voltamètre, on la lave et on la pèse, comme il a été dit plus haut. L'augmentation de poids donne la quantité de cuivre déposé. Supposons que cette augmentation soit de 4gr.325, l'intensité moyenne du courant a été de $\frac{4,325 \times 2}{1.177} = 7,37$ Amp.

On prend alors la moyenne des lectures du galvanomètre, qui auront varié par exemple entre 251 et 254, moyenne 252.5. Une déviation de 252.5 correspond à 7 amp. 37 donc 1 division correspond à une intensité de $\frac{7,37}{252,5}$.

En résumé la méthode revient à ne mesurer qu'une partie du courant, celle qui passe dans le galvanomètre.

Il faut que la résistance r ne varie pas pendant les opérations. Si l'on doit mesurer des courants très intenses, il faut prendre r petit. Pour des courants de moindre intensité on peut avoir un conducteur plus résistant de façon à laisser passer toujours à peu près le même courant à travers le galvanomètre.

Avec un seul appareil, on peut donc évaluer un courant quelle que soit son intensité ; il suffit de faire usage d'une résistance r de grandeur convenable.

CHAPITRE XIV

MESURE DES RÉSISTANCES

188. **Étalons secondaires de résistance, Rhéostats.** — Nous avons vu que les résistances opposées par les conducteurs au passage du courant, sont évaluées en fonction de l'*Ohm légal*, qui est l'unité pratique de résistance. Nous avons vu (116) la façon dont on établit les étalons types formés d'une colonne de mercure; comme ces étalons seraient d'un usage peu commode dans la pratique à cause de leur fragilité et de leurs grandes dimensions, on fait usage de copies formées d'un fil métallique généralement en maillechort.

Les étalons secondaires de l'*Ohm* (fig. 146) sont formés d'un fil de maillechort isolé avec de la soie AB; ce fil est enroulé en double, de façon que le champ magnétique de l'une des moitiés du fil soit annulé par celui de l'autre moitié. Si le fil était enroulé en une bobine simple, celle-ci constituerait un solénoïde dont le champ magnétique influencerait les galvanomètres.

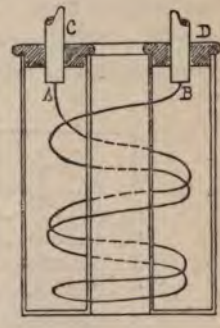


Fig. 146.

L'étalon ainsi formé est enfermé dans une boîte annulaire en laiton, fermée par un couvercle en ébonite à travers lequel passent deux fortes tiges en cuivre C et D, qui servent à établir les communications. Le tout

peut au besoin être placé dans l'eau chaude ou dans la glace fondante pour être amené à une température bien déterminée.

Ayant une bobine étalon d'une unité, il faut en construire des multiples. On les forme au moyen de fil fin, isolé avec de la soie, et enroulés sur des bobines en bois ou en ébonite A, A' (fig. 147). Ces bobines sont enroulées en double, comme nous l'avons indiqué pour l'étalon. Elles sont placées dans une boîte fermée par un couvercle en ébonite B, sur lequel sont fixés des blocs en laiton C, C', C''. Chacun de ceux-ci est mis en communication avec la fin d'une bobine et le commencement de la suivante.

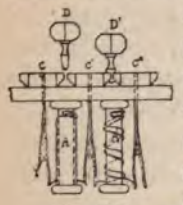


Fig. 147.

Lorsque les bouchons D D' sont insérés entre C C' et C' C'', le courant passe directement par ces pièces métalliques, pratiquement on peut négliger la partie qui passe par les bobines A, A'... Si l'on enlève l'un des bouchons D, tout le courant parcourt la bobine et l'on introduit ainsi une résistance dans le circuit. Les boîtes renfermant

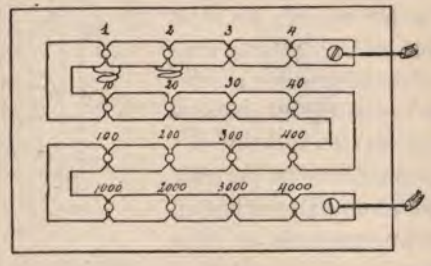


Fig. 148.

toute une série de ces bobines multiples de l'Ohm, se nomment *boîtes de résistances ou rhéostats.*

189. — Les rhéostats doivent comporter des bobines de diverses résistances, de façon que l'on puisse les combiner de manière à obtenir tous les multiples, depuis la plus petite résistance que comporte la boîte jusqu'à la somme de toutes les bobines. La figure 148 donne la disposition d'un rhéostat, qui permet de donner tous les multiples entiers de l'Ohm, depuis 1 jusqu'à 11110, toutes ces combinaisons peuvent être obtenues au moyen de 16 bobines.

190. **Rhéostats en décades.** — On emploie également une autre disposition des bobines dans les rhéostats ; elles sont rangées par séries de 9, ayant la même résistance (fig. 149). Sur une même ligne sont placées 9 bobines

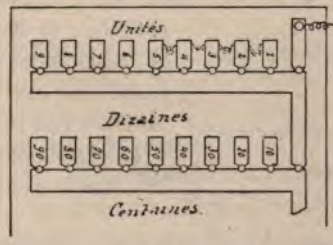


Fig. 149.

ayant chacune une unité, puis 9 bobines de 10, 9 bobines de 100, etc. Par l'examen de la figure, on peut voir qu'un seul bouchon suffit pour chaque série de bobines, seulement il faut 36 bobines pour une résistance totale de 9999 ohms.

On peut également placer les bobines en cercle, le courant est alors amené par une manette qui peut venir

s'appuyer sur des boutons de contact, entre lesquels les bobines de résistance sont placées.

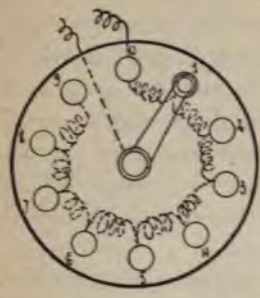


Fig. 150.

L'avantage des rhéostats en décades est d'être d'un emploi plus commode que les boîtes de résistance, présentant le premier arrangement indiqué.

191. **Mesure des résistances. — Méthode par substitution.** — Soit une résistance R à mesurer, on forme un circuit composé d'une pile, d'un galvanomètre et de la résistance. On note la déviation indiquée par le galvanomètre.

On remplace alors la résistance à mesurer par un rhéostat, et on fait varier la résistance de celui-ci, jusqu'à ce que la déviation obtenue soit la même.

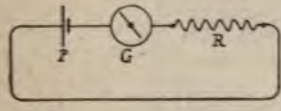


Fig. 151.

La résistance du rhéostat est égale à la résistance cherchée.

La méthode par substitution convient pour les essais ne demandant pas une grande précision, en effet pendant la durée de l'expérience, la pile peut se polariser et l'intensité du courant varier.

On ne peut évaluer la résistance qu'à une unité près, la plus petite bobine des rhéostats étant généralement de 1 ohm. On ne peut mesurer de résistance plus grande que celle que comporte le rhéostat dont on dispose.

Elle est employée pour la vérification des lignes télé-

graphiques et téléphoniques, pour la mesure des résistances de bobines.

192. **Méthode des déviations proportionnelles.** — Elle s'emploie pour la mesure des résistances très grandes, par exemple la résistance d'isolement des lignes télégraphiques, des cables, etc.

Principe. — Formons un circuit (fig. 152) composé d'une pile P, d'une résistance R très grande, 100000 ohms, par exemple, et d'un galvanomètre G avec Shunt S.

Avec une pile P de 10 éléments, une résistance R

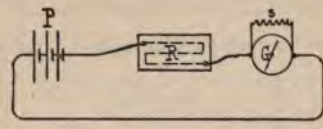


Fig. 152.

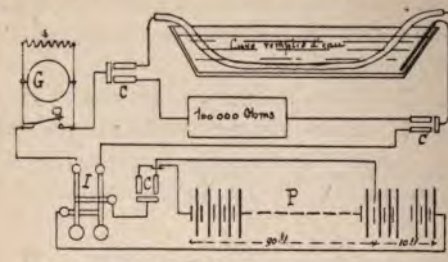
= 100000, et le Shunt S = 1/999, nous obtenons, je suppose, une déviation de 40 divisions.

Si nous remplaçons R par la résistance à mesurer, et si nous trouvons, par exemple, qu'avec la même pile, et sans shunt au galvanomètre, nous obtenons une déviation de 40 divisions, c'est que la résistance mesurée est 1000 fois plus grande que R, puisque dans les deux cas, nous avons le même courant dans le galvanomètre, mais comme dans le premier, la 1/1000 partie du courant seulement passait dans le galvanomètre, le courant circulant dans le circuit était 1000 fois plus grand que dans le second; la force électromotrice de la pile étant restée la même.

193. **Mesure de l'isolement d'un câble.** — Prenons le cas d'un câble électrique qui peut être destiné soit à la

télégraphie, la téléphonie ou l'éclairage électrique.

Le câble est placé dans une cuve métallique A remplie d'eau (fig. 153). On fait usage d'une pile P de 100 élé-



I. Inverseur de pile. C. Commutateurs à 2 directions.

Fig. 153.

ments Leclanché, et d'un galvanomètre astatique G très sensible, muni de son shunt S.

On commence par chercher la déviation que donne une pile de 10 éléments, le circuit étant formé par le galvanomètre G shunté au 1/1000 et une résistance de 100000 ohms. On obtient une certaine déviation, par exemple, 35°.

Ensuite, on envoie le courant des 100 éléments à travers le galvanomètre et l'âme du câble, la seconde extrémité de celle-ci étant isolée ; le circuit est fermé par l'isolant et l'eau de la cuve.

Supposons que sans shunt nous obtenions une déviation de 10 divisions.

Nous pouvons négliger la résistance du galvanomètre et de la pile vis-à-vis de la résistance du diélectrique du câble.

Dans la première opération nous avons, avec 10 élé-

ments, le galvanomètre étant shunté au 1/1000 et une résistance de 100000 ohms, une déviation de 40°.

Sans shunt, nous aurions 40000 divisions.

Avec 100 éléments, 400000.

Et avec 1000000 d'ohms 400,00

Une résistance de 1000000 d'ohms ou 1 megohm correspondrait donc à une déviation de 400000 divisions.

Nous avons obtenu 10 divisions à travers l'isolant du câble, l'intensité du courant est donc $\frac{40000}{10} = 4000$ fois plus petite, la résistance est donc égale à 4000 fois 1 megohm.

194. **Méthode du galvanomètre différentiel.** — Supposons que nous ayons à mesurer une résistance r, nous prendrons une pile P (fig. 154) dont nous réunirons l'un des pôles à l'une des extrémités de chacun des circuits du galvanomètre, entre l'autre pôle de la pile et les bornes C D du galvanomètre; nous intercalerons d'une part, la résistance r à mesurer, et d'autre part un rhéostat R. Nous déboucherons des résistances dans R, jusqu'à ce que l'aiguille soit revenue à zéro. Il est bien évident que dans ces conditions l'intensité du courant dans chacun des circuits est la même et par conséquent que $R = r$. Le rhéostat nous indiquera donc la résistance cherchée.

Fig. 154.

Si l'on avait à mesurer la résistance d'une ligne télégraphique ou téléphonique, on mettrait l'une des extrémités de celle-ci à la terre, ainsi que l'un des pôles de la pile et l'une des bornes du rhéostat (fig. 155.)

195. **Méthode du pont de Wheatstone.** — La méthode du galvanomètre différentiel convient très bien pour établir

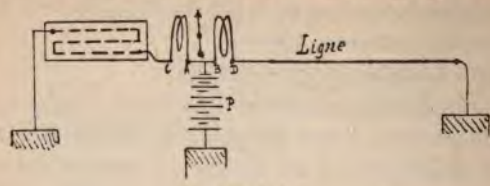


Fig. 155.

l'égalité de deux résistances, lorsque l'on n'a pas besoin d'une grande précision, mais elle ne permet de comparer ces résistances que dans les limites des rhéostats dont on dispose. La méthode que nous allons décrire permet au contraire de mesurer rapidement et avec exactitude des résistances dans des limites beaucoup plus étendues.

Voici le principe sur lequel repose la méthode dite *du pont de Wheatstone*. Si entre deux points A et B (fig. 156)

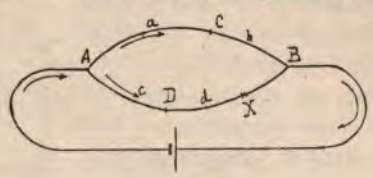


Fig. 156.

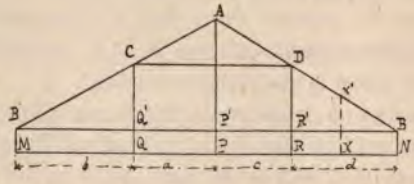


Fig. 157.

il se trouve deux conducteurs ACB et ADB, chacun de ces deux conducteurs sera parcouru par un courant en vertu de la différence de potentiel qui existe en A et B. Le long de ACB et de ADB, on aura des points à tous les potentiels compris entre celui de A et celui de B. Nous pouvons donc toujours choisir sur ces conducteurs des points C et D ayant le même potentiel, de façon que si on intercale un galvanomètre entre ces deux points, celui-ci ne décèlera le passage d'aucun courant. La chute de potentiel entre A et C sera la même qu'entre A et D, par conséquent, en vertu de la loi d'Ohm, on a

$$Ia = I'c \;.....\; (1)$$

De même $$Ib = I'd \;.....\; (2)$$

divisant membre à membre les deux égalités (1) et (2) on trouve $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ . . . . . (3).

On peut démontrer cette propriété d'une autre façon : Sur une droite MN (fig. 157), à partir d'un point P portons PN et PM proportionnelles respectivement à la résistance de ACB et ADB. Élevons en P, PA perpendiculaire à MN et proportionnelle au potentiel en A. En M et N élevons MB′ et NB proportionnelles au potentiel en B, joignons AB′ et AB, pour avoir le potentiel en un point X de ADB, il suffit de prendre PX proportionnelle à la résistance de ADX et d'élever en X une perpendiculaire à MN, XX′ représente le potentiel en X.

Si nous menons CD parallèle à MN, les points de rencontre AB′ et AB nous permettront de déterminer la position de deux points qui ont même potentiel sur ACB et ADB, il suffit pour cela d'abaisser sur MN les perpendiculaires CQ et DR ; PR et PQ représentant les résistances de A jusque D et de A jusque C. En réunissant les deux

points CD aux deux bornes d'un galvanomètre, celui-ci n'accusera le passage d'aucun courant, puisque C et D sont au même potentiel.

Dans les triangles AP'B et DR'B, nous avons :

$$\frac{AP'}{DR'} = \frac{c+d}{d} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1').$$

De même $\frac{AP'}{CQ'} = \frac{a+b}{d}$ . . . . . (2').

Et comme $DR' = CQ' \frac{c+d}{d} = \frac{a+b}{b}$.

Ou bien : $\frac{c}{d} = \frac{a}{b}$ . . . . . (3).

D'où $ad = bc$

196. **Pont de Wheatstone dans sa forme ordinaire.** — Supposons que nous ayons une résistance x à mesurer, formons un système de 6 conducteurs disposés comme

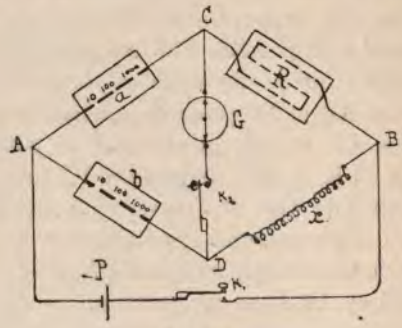


Fig. 158.

l'indique la figure 158. P est une pile dont on peut fermer ou ouvrir le courant au moyen de la clef K_1 ; a, b, R

sont 3 boîtes de résistances, x est la résistance inconnue, G un galvanomètre, et K_2 un interrupteur.

Laisons a et b fixes. et faisons varier R, il arrivera un moment où K_1 étant fermé, G restera au zéro que l'on ferme ou que l'on ouvre K_2. Quand ce résultat sera obtenu, ainsi que nous venons de l'établir, il existera entre a, b, R et x la relation

$$ax = bR \quad \text{d'où } x = \frac{b}{a} R.$$

Si, par exemple, on fait $b = 10$, $a = 100$ et que l'on trouve $R = 932$ ohms, $x = 0{,}1 \times 932 = 93{,}2$ ohms.

Les appareils employés dans la pratique sont généralement combinés de la façon suivante : a et b comprenent chacune 3 résistances, 10, 100, 1000 ohms, de sorte que le rapport $\frac{b}{a}$ peut être 100 ; 10 ; 1 ; 0,1 ; 0,01. Le rhéostat R peut donner tous les multiples entiers de l'Ohm de 1 à 10000 ; par conséquent, on peut évaluer des résistances x variant de $100 \times 10000 = 1000000$ d'ohms à $1 \times 0{,}01 = 0{,}01$ d'ohm.

Il n'est pas nécessaire de faire usage d'un galvanomètre à déviations proportionnelles, il suffit d'employer un simple galvanoscope.

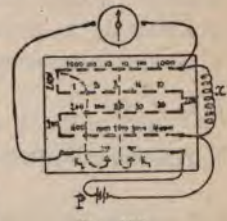


Fig. 159.

197. **Pont de Wheatstone. Modèle du Post-Office.** — La forme la plus généralement employée est celle qui est connue sous le nom de *modèle du Post-Office* (fig. 159). Il comprend, réunis dans une même boîte, les deux rhéostats a et b, qui portent le nom de

branches de comparaison ; le rhéostat R et les deux clefs K_1 et K_2 (1).

198. **Pont à fil divisé** (fig. 160). — Pour mesurer de très

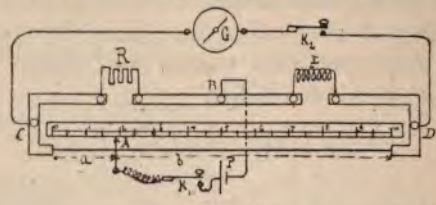


Fig. 160.

faibles résistances, avec beaucoup d'exactitude, on emploie une disposition qui, théoriquement, est la même que la précédente, mais qui en diffère sensiblement dans la forme. Le rhéostat variable R est remplacé par une résistance fixe, de grandeur aussi voisine que possible de celle à mesurer, supposons que l'on emploie 1 ohm étalon. Pour les branches de comparaison *a* et *b*, on prend un fil de maillechort ou de platine irridium de 1 mètre de long et de 1,5 millimètre de diamètre sur lequel glisse un contact A. Le long du fil se trouve une échelle divisée. Lorsque par tâtonnement on arrive à la position de A, pour laquelle aucun courant ne passe plus dans le galvanomètre, on a comme précédemment $x = \frac{b}{a}$ R.

Exemple. — R étant 1 ohm, si $b = 327$ millimètres

(1) Quand on fait une mesure au moyen du pont de Wheatstone, il faut toujours fermer la clef de pile avant la clef de galvanomètre. Si l'on faisait l'inverse le galvanomètre subirait le choc produit par les extra courants.

de fil $a = 673$ millimètres et $2 = \frac{327}{673} = 0{,}485$ ohm.

199. **Pont de Kohlrausch.** — Comme la méthode que nous venons de décrire ne demande l'emploi que d'un simple galvanoscope, Kohlrausch fait usage dans ce but d'un téléphone ; seulement on ne peut plus employer une pile simple, il faut intercaler une bobine d'induction entre la pile et le pont de façon à envoyer des courants alternatifs dans l'appareil. On déplace le curseur sur le fil divisé jusqu'à ce que l'on entende le minimum de bruit dans le téléphone.

Cet appareil ne convient que pour la mesure des résistances dont la self induction est très faible.

200. **Mesure des résistances très faibles. Méthode de M. Rousseau.** — La méthode du pont à fil divisé ne convient que quand on a à sa disposition un étalon de grandeur comparable à celle de la résistance à mesurer.

Supposons que nous voulions mesurer une résistance de 0,001 d'ohm au moyen de cet appareil, alors que nous avons pour R une bobine de 1 ohm, nous aurons :

$$0{,}001 = \frac{b}{a}\,1 \text{ ; comme } a + b = 1000.$$

$$0{,}001 = \frac{b}{1000 - b} \quad \text{d'où } b = \frac{1}{1{,}001}\,a = \frac{1000}{1{,}001}.$$

$$a = 999{,}088 \text{ millimètres.}$$

$$b = \quad 0{,}912.$$

On voit clairement par là que la plus petite erreur sur l'évaluation des longueurs a et b entraînerait une grande erreur sur x.

M. Rousseau a imaginé une méthode qui donne beaucoup plus de latitude. On met à la suite l'une de l'autre la résistance étalon r et la résistance X à mesurer

(fig. 161). On envoie à travers ces deux résistances le courant d'une pile P constante, par exemple, d'un accumulateur; M est une résistance qui sert à régler l'intensité du courant.

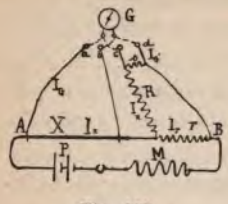


Fig. 161.

On met les deux extrémités de la résistance X à mesurer en communication avec les bornes d'un galvanomètre à miroir sensible G, et l'on règle M de façon à obtenir une déviation qui ne soit pas trop grande. Je suppose que l'on obtienne une déviation α.

On enlève les communications *a* et *b* et l'on établit *c* et *d;* comme la résistance étalon *r* est beaucoup plus grande que X, il faut le shunter de façon qu'il ne reçoive pas un courant trop intense, S est une bobine placée en déviation sur le galvanomètre, et R est un rhéostat que l'on règle de façon à obtenir une déviation α' très voisine de α. On peut admettre alors que l'intensité qui a produit la déviation est au courant qui produit la déviation α' comme $\frac{\alpha}{\alpha'}$.

Appelons G la résistance du galvanomètre : Lorsque les connections *a* et *b* sont établies, I étant l'intensité totale qui est fournie par la pile, l'intensité I_G du courant dans le galvanomètre se déduit d'après les lois de Kirchoff (79) des équations

$$I_x \times X = I_G\, G \text{ et } I_x + I_G = I$$

$$I_G = I.\frac{X}{G + X} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1).$$

Supprimons les connections *a*, *b* et établissons *c* et *a*; faisons varier R jusqu'à ce que la déviation α' donnée

par le galvanomètre soit voisine de α, de telle sorte que l'on puisse admettre sans erreur sensible la proportionnalité des intensités aux déviations, appelons $I_{G'}$ l'intensité du courant qui parcourt le galvanomètre.

Appelons s' la résistance combinée de G et de S, d'après ce que nous avons vu des courants dérivés (77) $s' = \frac{Gs}{G + s}$.

L'intensité du courant dans R est donnée par l'équation

$$I_R = I. \frac{r}{r + R + s'}$$

et $$I_{G'} = I_R. \frac{s}{G + s} = I_R. \frac{s'}{G}.$$

Donc $$I_{G'} = I. \frac{rs'}{G(r + R + s')} \quad \ldots\ldots\ldots (2).$$

Dans la relation $\frac{I_G}{I_{G'}} = \frac{\alpha}{\alpha'}$, substituons les valeurs de I_G et de $I_{G'}$ (1) et (2).

$$\frac{I. \frac{r}{r + R + s'} . \frac{S'}{G}}{I. \frac{X}{G + X}} = \frac{\alpha}{\alpha'} \text{ ou : } \frac{rs'(G + X)}{G(r + R + S')} = X. \frac{\alpha}{\alpha'}$$

$$\frac{rS'}{r + R + S'} + \frac{rS'}{r + R + S'} \times \frac{X}{G} = X \frac{\alpha}{\alpha'} \ldots\ldots\ldots (3).$$

Comme X est toujours très petit, par exemple, 0,01 d'ohm et que G est au moins de 250 ohms, $\frac{X}{G}$ est très petit et en négligeant le deuxième terme du second membre nous faisons une erreur de $\frac{1}{25000}$, ce qui est tout à fait négligeable. La formule (3) se réduit à :

$$X = \frac{rS'}{r + R + S'} \times \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

Exemple. — Supposons que nous ayons G = 250 ohms, S = 5 ohms, R = 1100 ohms, r = 2 ohms; x = 76 x' = 75 divisions.

$$X = \frac{2 + 1100 + 4.9}{2 \times 4.9} \times \frac{75}{76} = 0{,}0885 \text{ Ohm.}$$

201. **Résistance spécifique des conducteurs. Conductibilité spécifique.** — Nous avons vu que pour des dimensions déterminées, la résistance électrique d'un corps dépend de sa nature.

On appelle *résistance spécifique d'un corps, la résistance que présente au passage du courant un conducteur de 1 centimètre de long et de 1 centimètre carré de section et par conséquent de 1 centimètre cube de volume.* Comme on appelle poids spécifique d'un corps son poids sous l'unité de volume. *La conductibilité spécifique est l'inverse de la résistance spécifique.*

Le tableau suivant donne la résistance spécifique en microhms des principaux métaux, et la résistance relative de ceux-ci, la conductibilité de l'argent étant prise pour unité.

MÉTAL.	RÉSISTANCE EN MICROHMS A 0°.	RÉSISTANCES RELATIVES.
Argent recuit	1.504	1
Cuivre recuit	1.598	1.065
Cuivre écroni	1.634	1.086
Or recuit	2.058	1.369
Aluminium	2.912	1.935
Zinc	5.626	3.741
Fer recuit	9.716	6 460
Nickel	12.470	8.285
Argent allemand	20.950	13.050
Mercure	94.520	62.750

Le mica a une résistance spécifique de			84 millions de megohms.	
La gutta-percha	—	—	450	—
L'ébonite	—	—	28000	—
La paraffine	—	—	34000	—
L'air	—	—	pratiquement infinie.	

Le tableau ci-dessus montre que le cuivre recuit est la matière qui convient le mieux pour conduire les courants électriques, l'argent devant être écarté à cause de son prix. L'argent allemand ou maillechort au contraire, à cause de sa grande résistance spécifique, convient très bien pour la construction des rhéostats et des résistances artificielles.

Le charbon employé pour constituer l'électrode positive des piles, ou les crayons pour l'éclairage par arc voltaïque, a une résistance très variable, suivant sa compacité, elle peut varier de 3500 à 8000 microhms par centimètre cube.

La résistance spécifique des alliages est toujours plus grande que celle des métaux qui entrent dans leur composition. C'est pour cette raison qu'il importe tant d'avoir du cuivre pur lorsque l'on veut transmettre des courants de haute intensité avec le plus petit poids de conducteur possible.

La conductibilité électrique et la conductibilité calorifique ont une certaine relation, les corps bons conducteurs de l'électricité, le sont également de la chaleur.

202. **Loi de variation de la résistance avec la température du conducteur.** — Plaçons un conducteur AB en cuivre par exemple (fig. 162), dans un liquide isolant, de l'huile lourde de pétrole, dont on puisse élever progressivement la température.

Mesurons d'abord la résistance AB à la température

du laboratoire, au moyen de l'une des méthodes indiquées, puis chauffons le récipient en agitant le liquide pour que la température soit uniforme. Nous constaterons que la résistance de AB augmente en même temps que la température. L'augmentation de résistance est proportionnelle à l'accroissement de la température, entre 0 et 100°. Ainsi r étant la résistance en ohms à 0°, la résistance à t° est $R = r(1 + \alpha t)$, α étant le coefficient d'augmentation de résistance, c'est-à-dire la fraction dont la résistance spécifique augmente pour une augmentation de température de 1° centigrade.

Fig. 162.

Les métaux très purs ont à peu près tous le même coefficient de variation, il est d'environ 0,0038 par degré, sauf pour le mercure dont le coefficient est de 0,00075. La résistance des alliages varie beaucoup moins que celle des métaux purs ; ainsi pour l'argent allemand ou maillechort il est de 0,0004, soit à peu près 0,1 de celui des métaux purs.

Pour les fils de bronze phosphoreux servant à la construction des lignes téléphoniques aériennes et dont la conductibilité est d'environ 30 p. 100 de celle du cuivre pur le coefficient d'augmentation de résistance est de 0,00125 à 0,00128 pour 1°. Tandis que la résistance des fils de bronze phosphoreux servant pour la construction des lignes télégraphiques, la lumière électrique, le transport de la force, et dont la conductibilité se rapproche de celle du cuivre pur, le coefficient de variation est sensiblement le même que pour ce dernier métal (1).

Dans beaucoup de cas, le changement de la résistance

(1) Voir le Compte rendu des travaux du Comité international chargé des essais électriques à l'Exposition d'Anvers de 1885.

du conducteur avec la température n'est pas négligeable comme nous venons de le voir, pour le cuivre la variation est en chiffre rond de 0,4 p. 100 par degré.

La résistance des *corps mauvais conducteurs* ou *médiocrement conducteurs* diminue lorsque la température augmente, contrairement à ce que l'on observe pour les métaux. Ainsi la résistance des charbons des lampes à arc diminue environ de $\frac{1}{25}$ pour une augmentation de température de 100°.

Une lampe à incandescence Siemens, type de 16 bougies, dont le filament présente à froid une résistance de 106 ohms, n'a plus que 60,7 ohms lorsqu'elle fournit son intensité lumineuse normale.

La résistance électrique de la gutta-percha, du caoutchouc, du verre et de tous les isolants en général, diminue lorsque leur température s'élève.

203. **Problèmes.** — I. Quelle est la résistance électrique en ohms à la température de 35° d'un fil de cuivre de 75 mètres de long et de 2 millimètres de diamètre.

Calculons d'abord la résistance en ohms à 0°. La résistance d'un conducteur de 1 centimètre de long et de 1 centimètre carré de section est de 1,598 microhm. Le fil en question a une section de 3,14 millimètres carrés, la résistance de 1 centimètre de ce fil serait donc de $1.598 \times \frac{100}{3.14}$ microhm, et celle de 75 mètres sera de $1.598 \times \frac{100 \times 7500}{3.14}$ microhms, soit <u>0,38175 ohm</u> à 0°.

Comme la résistance augmente de 0,0038 par 1°, à 35° elle sera de

$$0,30175\,(1 + 0,0038 \times 35) = \underline{0,432 \text{ ohm.}}$$

L'augmentation de résistance pour 35° est donc de 13,3 p. 100.

II. Quelle est la conductibilité par rapport à celle du cuivre pur, d'un conducteur pesant p grammes par mètre courant, formé d'un métal d'une densité δ, et présentant une résistance de r microhms par mètre courant à une température de t°. Le cœfficient de variation de résistance étant α par degré.

La section s du conducteur en question est de

$$s = \frac{p}{\delta \times 100} \text{ centimètres carrés.}$$

La résistance est de $\frac{r}{100}$ microhms par centimètre de longueur pour une section s. Pour 1 centimètre carré de section, cette résistance sera de

$$\text{Résistance spécifique à t}^\circ = \frac{rs}{100} = \frac{rp}{\delta \times \overline{100}^2} = \text{R}.$$

La résistance spécifique x à 0° est donnée par la formule $\text{R} = x\,(1 + \alpha\,\text{t})$.

$$x = \frac{rp}{\delta\,(100)^2\,(1 + \alpha\,\text{t})}.$$

Et la résistance spécifique rapportée à celle du cuivre pur sera de $\frac{1.598}{x}$.

Application. — Soit $r = 2444$, $\text{t} = 20^\circ$, $\delta = 8{,}92$, $p = 66$, $\alpha = 0{,}0038$, il s'agit donc d'un conducteur en cuivre.

$$x = \frac{2444 \times 66}{8{,}92 \times 10000 \times 1{,}076} = 1{,}68 \text{ microhm.}$$

La conductibilité par rapport à celle du cuivre pur est de $\text{C} = \frac{1.60}{1.68} = 0{,}952$.

La conductibilité du cuivre en question est donc de 95,2 p. 100 de celle du cuivre pur (1).

204. **Résistance électrique de la terre.** — Soit une pile P dont les pôles sont mis en communication d'une part

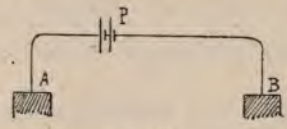


Fig. 163.

avec le sol en un point A, et d'autre part en B, le courant sera fermé par l'intermédiaire de la terre. Or les potentiels des points A et B sont égaux, la terre étant un conducteur dont le potentiel est le même en tous les points, il en résulte que le courant fourni par la pile est le même que les points A et B du conducteur soient réunis directement ou bien par l'intermédiaire du sol, quelle que soit la distance qui sépare A et B. Il en résulte que le sol agit comme un conducteur de résistance nulle.

(1) Pour ce qui concerne les conductibilités des métaux, on s'en rapporte toujours aux déterminations déjà très anciennes de Matthiessen, or on fabrique aujourd'hui couramment des cuivres beaucoup plus purs que ceux sur lesquels ce physicien a opéré. Il en résulte que l'on trouve souvent des conductibilités spécifiques plus élevées que celles de l'étalon et qui s'élèvent jusqu'à 104 p. 100 de la conductibilité de celui-ci.

CHAPITRE XV

MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES ET DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

205. Mesure de la force électromotrice des piles. Méthode par opposition. — Cette méthode consiste à rechercher combien d'éléments de pile de force électromotrice connue il faut mettre en opposition à une pile de force électromotrice inconnue, pour qu'il y ait équilibre entre les forces électromotrices des deux piles.

Soit P la pile inconnue dont nous cherchons la force électromotrice, nous lui mettons en opposition des éléments P' en nombre tel que le galvanomètre G indique qu'aucun courant ne passe plus.

Si n est le nombre d'éléments en P et x leur force électromotrice, on aura alors l'égalité $nx = n'e$, n étant le nombre d'éléments de la pile P' et e leur force électrotrice, de là on déduit : $x = \frac{n'}{n} e$.

Il est toutefois à remarquer que l'on n'arrivera presque jamais à trouver un nombre d'éléments n' tel que $n'e = nx$. Mais on arrivera à ce résultat que nx est compris entre $n'e$ et $(n' + 1)e$, de sorte que x sera compris entre $\frac{n'}{n} e$ et $\frac{n' + 1}{n} e$. On voit par là que l'on peut arriver à une approximation d'autant plus grande que n et n' sont plus grands et par conséquent que l'on emploie plus d'éléments.

Supposons que nous voulions comparer la force électromotrice des éléments Leclanché à celle des Daniell. Nous pouvons admettre que les éléments Daniell, dont nous ferons usage, ont une force électromotrice de 1,06 volt.

Mettons 3 Leclanché en tension, d'après le sens de la déviation du galvanomètre G (fig. 164), nous verrons que 4 Daniell ont une force électromotrice plus petite et que 5 Daniell ont une force électromotrice plus grande que celle de la pile examinée, par conséquent $4 \times 1{,}06 < 3 \times x < 5 \times 1{,}06$.

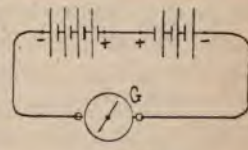


Fig. 164.

Donc x est compris entre $\frac{4}{3} \times 1.06$ et $\frac{5}{3} \times 1{,}06$ ou entre 1,41 volt et 1,76 volt.

Faisons maintenant l'expérience avec 6 Leclanché, nous trouvons

$$8 \times 1{,}06 < b.\ x < 9 \times 1{,}06.$$

Donc x est compris entre $\frac{8}{6}\ 1{,}06 = 1{,}41$ volt et $\frac{9}{6} 1{,}06 = 1{,}59$ volt.

En opérant sur des nombres de plus en plus grands d'éléments on arriverait à rapprocher toujours les deux nombres entre lesquels la valeur de x est comprise.

La méthode par opposition que nous venons de décrire ne donne qu'une approximation assez grossière, à moins que l'on emploie un très grand nombre d'éléments, mais alors il y a une nouvelle cause d'erreur qui vient s'introduire, c'est la différence de force électromotrice qui peut exister entre les éléments dont on fait usage

comme étalons. — Lorsque les éléments que l'on compare se polarisent rapidement, comme c'est le cas pour les éléments Leclanché, la méthode que nous venons de décrire ne peut pas être employée parce que le courant doit rester fermé pendant un temps plus que suffisant pour permettre la polarisation des éléments.

206. **Méthode par la boussole des tangentes.** — On peut comparer la force électromotrice à deux piles, en mesurant l'intensité du courant qu'elles peuvent produire à travers une résistance connue.

Les forces électromotrices des éléments considérés sont entre elles comme les intensités des courants qu'elles produisent à travers une même résistance.

La somme des résistances de la boussole des tangentes et de la résistance extérieure doit être assez grande pour que la pile ne se polarise pas d'une façon sensible pendant l'expérience, et pour que sa résistance intérieure soit négligeable vis-à-vis de la résistance totale du circuit.

207. **Voltmètres.** — Supposons que l'on veuille déterminer la différence de potentiel entre deux points déterminés A et B pris sur deux conducteurs en communication avec une source d'électricité qui maintienne cette différence constante, par exemple avec les pôles d'une machine électrique ou d'une pile. Plaçons entre les points A et B un galvanomètre G, celui-ci sera parcouru par un courant dont l'intensité variera comme la différence de potentiel entre A et B. Il faut que la résistance de G soit très grande par rapport au reste du circuit pour que le courant qui traverse le galvanomètre soit négligeable vis à vis du courant principal, qu'il soit, par exemple, au maximum 0,0001 de ce dernier.

La mesure des différences de potentiel revient ainsi à la mesure de l'intensité du courant qui traverse un galvanomètre de résistance fixe. Seulement au lieu de graduer cet appareil en Ampères, on le gradue en Volts et les appareils ainsi construits s'appellent *voltmètres*.

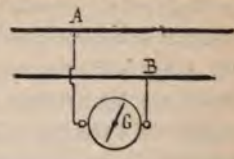


Fig. 165.

La graduation se fait de la façon suivante. Supposons que nous ayons un Voltmètre de 4000 ohms de résistance, si nous établissons entre ses bornes une différence de force électromotrice de 10 Volts, il sera parcouru par un courant de 1/400e d'Ampère, son aiguille s'arrêtera en un certain point du cadran où nous marquerons 10 Volts, pour 20 Volts nous aurons une autre déviation où nous mettrons le chiffre 20 et ainsi de suite. Chaque fois que nous placerons le galvanomètre ainsi gradué entre deux points et que l'aiguille s'arrêtera sur la division 20 par exemple, c'est qu'il y a une différence de 20 volts entre les bornes du galvanomètre.

La mesure des différences de potentiel revient donc à la mesure de l'intensité d'un courant produit dans une résistance constante. Tous les Ampèremètres que nous avons décrits peuvent servir comme Voltmètres à condition de subir la modification suivante : l'une des parties constituantes de ces appareils est toujours un solénoïde qui produit un certain champ magnétique; dans le cas de l'Ampèremètre, tout le courant passe par ce solénoïde, il ne faut donc qu'un petit nombre de tours pour arriver à l'intensité magnétique voulue, et la bobine a ainsi une résistance très faible.

Dans le cas du Voltmètre au contraire, il faut arriver à

la même intensité du champ magnétique avec un courant faible, on doit donc employer une bobine présentant un grand nombre de tours.

208. **Voltmètres pour courants alternatifs.** — Comme pour les Ampèremètres, on ne peut pas faire usage d'appareils basés sur les actions électro-magnétiques ; on doit faire usage de l'électro-dynamomètre, mais comme celui-ci est d'un emploi peu commode pour l'industrie, on se sert du Voltmètre de *Cardew* qui est basé sur le principe suivant :

Quand un fil métallique est traversé par un courant, il s'échauffe et par conséquent se dilate. Dans le Voltmètre de Cardew, on emploie un fil d'alliage de platine-argent, ayant 13 pieds de longueur (3m95) et 0,064 millimètres de diamètre, fixé à l'une de ses extrémités, l'autre étant enroulée sur un tambour ; un ressort maintient toujours le fils tendu, de sorte que quand celui-ci se dilate, le tambour tourne d'un certain angle et communique son mouvement amplifié à une aiguille qui indique sur un cadran l'allongement du fil d'où l'on peut déduire la force électromotrice.

209. — Un Voltmètre étant construit pour une force électromotrice maximum déterminée, on peut l'employer pour des différences de potentiel plus grandes, il suffit pour cela de placer en série avec le galvanomètre une résistance convenable (fig. 166).

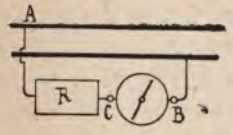


Fig 166.

Supposons, par exemple, que nous ayons un Voltmètre construit pour mesurer au maximum 100 Volts, si nous lui ajoutons une résistance égale à la sienne, nous pourrons l'employer pour mesurer jusqu'à 200 Volts,

puisque dans ces conditions pour 200 Volts entre A et B (fig. 166) il sera parcouru par un courant égal à celui qui le traverserait pour 100 Volts entre C et B. Si nous faisons R = 9 G, on pourra se servir du Voltmètre pour mesurer les forces électromotrices jusque 1000 Volts en multipliant les chiffres du cadran par 10. Mais il faut remarquer que la sensibilité de l'appareil sera diminuée dans le même rapport puisqu'une déviation de 1 division correspondant à 1 Volt dans le premier cas, correspondra à 10 Volts dans le second.

210. **De l'influence de la température sur les indications des Voltmètres et des Ampèremètres.** — L'influence de la variation de résistance que peut présenter la bobine d'un Ampèremètre, par suite de la variation de l'échauffement produit par le passage du courant, ou bien par suite des variations de la température extérieure, est absolument négligeable. La résistance de l'Ampèremètre est toujours une fraction très petite de celle du circuit dans lequel il est intercalé, il en résulte que les variations de la température ont simplement pour effet de modifier l'intensité du courant d'une façon insensible.

Il n'en est pas de même pour ce qui concerne les Voltmètres, dans ces appareils au contraire la résistance est très grande par rapport à celle du circuit principal et les changements de résistance ont une influence très grande, surtout si la bobine est en cuivre.

Supposons que nous fassions usage d'un Voltmètre à bobine en cuivre, de 3000 Ohms de résistance et calibré à 15°. Lorsque la température de l'appareil arrivera à 25° par exemple, ce qui n'a rien d'excessif, la résistance de la bobine sera devenue $R' = 3000\ (1 + 0{,}0038 \times 10) = 3114$ Ohms, la résistance aura varié de 3,8 p. 100 et

l'appareil au lieu de marquer 100 Volts indiquera 96,2 Volts. Si au lieu d'être en fil de cuivre la bobine était en maillechort, l'erreur serait environ 10 fois plus petite, la résistance de cet alliage variant beaucoup moins que celle du cuivre par suite des changements de température.

En tous cas cette erreur est loin d'être négligeable surtout lorsque l'on veut faire des mesures avec quelque précision.

211. **Tarage des Voltmètres.** — On envoie le courant d'une pile P de faible résistance intérieure et de force électromotrice constante, (de préférence 1 élément d'accumulateur pouvant donner 2 Ampères pendant 1/2 heure sans que sa force électromotrice change d'une façon appréciable), à travers un Voltmètre V à sulfate de cuivre,

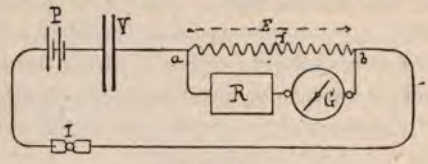


Fig. 167.

dont l'électrode négative est formée d'une lame de platine préalablement pesée, une résistance *r* formée par 1 Ohm étalon en fil suffisamment gros pour qu'il ne s'échauffe pas par le passage du courant et un interrupteur I.

Entre les deux extrémités *a* et *b* de l'Ohm étalon, on place en dérivation le galvanomètre G à étalonner et une résistance R qui dépend de la sensibilité du galvanomètre.

En employant un élément d'accumulateur comme pile,

l'intensité du courant dans le circuit principal sera d'environ 1,8 Ampère. La chute de potentiel depuis *a* jusque *b* sera donc de 1,8 Volts.

Je suppose que nous voulions tarer un galvanomètre Deprez d'Arsonval pour nous en servir comme d'un Voltamètre. Nous réglerons R de façon que les déviations restent dans les limites de l'échelle ; pour un galvanomètre de 250 ohms de résistance, il faudra faire R = 10000 ohms environ.

Conduite de l'opération. — On ferme le courant en I, pendant une demi-heure, on note les déviations du galvanomètre toutes les minutes ou toutes les deux minutes pour s'assurer que le courant reste bien constant. Au bout de la demi-heure on coupe le courant, et on pèse la plaque négative du Voltamètre. On trouve je suppose une augmentation de poids de *p* grammes.

L'intensité moyenne du courant a été de $\frac{2p}{1,18}$ Ampères, et la chute de potentiel de *a* jusque *b* a été de E = IR soit $\frac{1 \times 2p}{1,18}$ Volts.

Si *d* est la moyenne des déviations observées, chaque déviation représentera $\frac{1,18d}{2p}$ volt, ou 1 volt sera représenté par $\frac{1,18 \times d}{2p}$ divisions.

Supposons que l'on veuille régler l'appareil pour prendre les forces électromotrices des piles, pour plus de facilité on s'arrangera de telle sorte que 1 volt produise une déviation de 100 divisions, on fera pour cela varier R de façon que $(R + G)\, Ig = (R' + G)\, Ig'$.

I*g* étant l'intensité du courant produite par la force

électromotrice E dans le galvanomètre avec une résistance R et Ig' l'intensité avec une résistance R' intercalée. Nous pouvons admettre que Ig et Ig' sont proportionnelles aux déviations et par conséquent

$$(R + G)\ \frac{1,18d}{2p} = (R' + G)\ 100.$$

Équation qui permet de déterminer R'.

Si avec le même appareil nous voulons mesurer des différences de potentiel de 100 volts, il faudra intercaler une résistance R'' beaucoup plus grande, telle que

$(R'' + G) = 100\,(R' + G)$ d'où $R'' = 100\,R' + 99\,G$.

Dans ces conditions, 1 volt sera représenté par une déviation de 1 division.

212. **Calibrage des Voltamètres industriels.** — Les Voltmètres industriels doivent se calibrer en comparant leurs indications à celles d'un appareil sensible et gradué comme nous l'avons indiqué au paragraphe précédent. On emploie pour cela une source d'électricité S, machine dynamo ou batterie d'accumulateurs, on ferme le courant à travers une résistance variable R, et l'on place en dérivation entre *a* et *b* (fig. 168*a*) le Voltamètre G à calibrer et l'appareil type G'. On fait varier R, et l'on peut ainsi comparer les indications des deux appareils.

On peut encore employer la méthode suivante, qui est

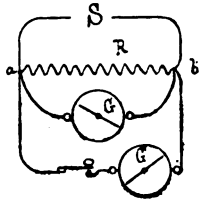


Fig. 168*a*.

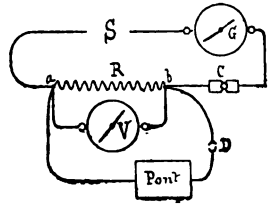


Fig. 168*b*.

une variante de la précédente, elle suppose l'emploi d'un Ampèremètre G, calibré exactement (fig. 168*b*), comme tout à l'heure, on ferme le courant de la source S, à travers une résistance variable R, mais on intercale l'Ampèremètre G, et un interrupteur C. Le Voltmètre à vérifier V est placé en dérivation entre *a* et *b*. P est un pont de Wheatstone installé de façon à pouvoir mesurer rapidement la résistance combinée de R et V, en coupant C et en établissant la communication D.

Entre l'intensité I du courant indiquée par G, la chute du potentiel E indiquée par V et la résistance combinée de R et V, R', donnée par le pont, nous avons la relation

$$E = R' I.$$

R' et I étant mesurés directement nous en déduirons E, ce qui nous permettra de graduer l'appareil.

La grandeur de la résistance à intercaler dépend de l'Ampèremètre dont nous disposons. Si nous voulons, par exemple, calibrer des Voltmètres jusqu'à 100 Volts, il faut aller jusque $R' I = 100$. Si A nous permet de mesurer jusqu'à 10 Ampères, il faudra faire varier R' de 0 à 10 ohms, à condition que I soit maintenu constamment égal à 10 Ampères.

Si A nous permet de mesurer jusqu'à 20 Ampères, nous ne devons faire varier R' que de 0 à 5 ohms.

CHAPITRE XV

MESURES A FAIRE DANS UN LABORATOIRE INDUSTRIEL

213. **Mesure de la conductibilité des fils employés comme conducteurs.** — On peut employer deux méthodes : 1° chercher quelle est la longueur du fil à essayer dont la résistance est égale à celle d'une résistance connue ; 2° mesurer directement la résistance électrique d'une longueur déterminée du conducteur.

Première méthode. — On fait usage d'un pont de Wehtstone d'un modèle spécial construit par la maison Elliott, de Londres (fig. 169). Ce pont a les deux branches de comparaison égales, le rhéostat variable R comprend 3 bobines, 1 mètre de fil de cuivre pesant 1 gramme, 2 mètres de fil de cuivre pesant 1 gramme et 3 mètres de fil de cuivre pesant 1 gramme. On fait varier la longueur de x jusqu'à ce que la résistance soit égale à celle de l'une des trois bobines R.

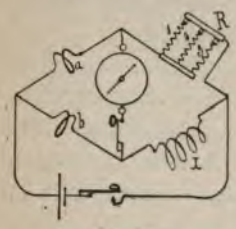


Fig. 169.

Appelons c la conductibilité spécifique d'un conducteur et s sa section en centimètres carrés et l sa longueur en centimètres, sa résistance r en Ohms sera de :

$$r = \frac{1}{c} \times \frac{l}{s}.$$

Si p est le poids en grammes de ce conducteur et δ sa densité, $s = \frac{p}{l.\delta}$.

donc $r = \frac{1}{c} \times \frac{l^2}{p.\delta}$ et à 0° : $r_0 = \frac{1}{c} \times \frac{l^2}{p.\delta} \times \frac{1}{1+\alpha t}$...(a).

Les mêmes éléments pour un autre conducteur étant représentés par c', s', l', p'. δ', α', et t' on aura

$$r'_0 = \frac{1}{c'} \times \frac{l'^2}{p'\delta'} \times \frac{1}{1+\alpha' t'} \quad \ldots\ldots \quad (b).$$

Si l'on s'arrange de façon que $r = r'$ on aura

$$r_0 (1 + \alpha t) = r'_0 (1 + \alpha' t') \text{ et}$$

$$\frac{1}{c} \times \frac{l^2}{p.\delta} = \frac{1}{c'} \times \frac{l'^2}{p'\delta'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1).$$

Connaissant $l.p.\delta$ et $l'p'\delta'$ on pourra déduire de l'équation (1) le rapport $\frac{c'}{c} = \frac{l'^2}{p'\delta'} \times \frac{p.\delta}{l^2}$.

Revenons maintenant à l'emploi du pont de conductibilité. Le point de comparaison est l'une des bobines en cuivre dont les éléments sont connus.

Ainsi pour la bobine 1, $l = 100$, $p = 1$ $\delta = 8{,}92$ et $r_0 = 1424$ microhms à 0° (étalon Matthiessen).

Si l'on cherche la conductibilité d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre, nous allons déterminer quelle est la quantité de fil dont la résistance est égale à celle de la bobine de cuivre de 1 Ohm pesant 1 gramme. Comme la mesure de la longueur d'une bobine de 15 à 16 mètres de fil serait très difficile à faire exactement, nous pèserons le fil, nous obtiendrons un poids p', nous diviserons p' par le poids de 1 mètre du fil essayé. Il suffira donc de mesurer une longueur de 1 mètre avec exactitude et pour opérer d'une façon tout à fait rigoureuse, il faut prendre la densité du fil essayé. La formule $\frac{c'}{c} = \frac{l'^2}{p'\delta'} \times 8{,}92$ nous donne la conductibilité par rapport à celle du cuivre à condition que l'on suppose

la bobine du pont et le fil à essayer se trouvent à la même température et que l'on néglige la différence qui peut exister entre les coefficients α et α' pour les deux métaux.

Si l'on mesure la conductibilité de fils de cuivre on peut admettre que la densité du fil essayé est égale à celle du cuivre de la bobine étalon, alors $\delta' = \delta$ et la formule se réduit à $\frac{c'}{c} = \frac{l^2}{p}$.

On évite ainsi la mesure du diamètre qui est extrêmement difficile à faire avec exactitude surtout pour des fils de petit diamètre et on la remplace par des mesures de longueur et des pesées.

La méthode que nous venons de décrire ne peut guère être employée que pour des conducteurs de petit diamètre ou de faible conductibilité. Ainsi pour du fil de fer de 4 millim. de diamètre il faut opérer sur 15 à 16 mètres de fil pesant environ 1 kil. 500. Pour du fil de fer de 5 millim. on arrive à 24 à 25 mètres pesant 3,5 à 4 kilogr.

Dans le cas du fil de cuivre de 2 millim. de diamètre et 98 p. 100 de conductibilité de l'étalon Matthhiessen, il faut opérer sur 27,158 mètres pesant 752,500 gr.

S'il s'agissait d'un conducteur en cuivre de 4 millim., on devrait employer une longueur quatre fois plus grande que pour celui de 2 millim. soit 105,600 mètres, pesant 112,4 gr. par mètre courant, soit 12,207 kilogr.

Dans les usines où l'on fabrique les conducteurs, on peut tourner la difficulté en ramenant tous les fils à essayer à un diamètre suffisamment petit pour que la longueur du fil à manipuler et le déchet ne soient pas trop grands.

Ainsi on peut ramener les fils de cuivre ou de conduc-

tibilité voisine au diamètre de 0,5 millim., on ne devra alors opérer que sur 1,5 à 2 mètres de fil pesant 2 à 3 gr. sous ce diamètre le fil est très maniable. L'inconvénient est le temps dépensé et le coût de la main-d'œuvre de tréfilage qui sont loin d'être négligeables lorsque l'on doit vérifier un grand nombre d'échantillons.

Lorsque l'on n'a pas de tréfileurs à sa disposition, il faut employer une autre méthode qui permette de mesurer la conductibilité des fils sans produire trop de déchet. La méthode la plus recommandable est alors celle de M. Rousseau pour la mesure des faibles résistances (200).

Deuxième méthode. — Méthode de M. Rousseau. — Elle consiste à mesurer directement la résistance en ohms d'une certaine longueur du conducteur à essayer, en prenant comme résistance de comparaison r (200) soit un ohm étalon, soit une certaine longueur de fil de cuivre pur si l'on compare la conductibilité à celle de ce dernier métal.

On opère en prenant pour X une longueur de fil d'un peu plus de 1 mètre, on trace deux traits distants exactement de 1 mètre et l'on serre en ces points le conducteur à mesurer entre deux pinces d'où partent les fils a et b allant au galvanomètre. On fait la mesure comme nous l'avons dit au § 200, ce qui nous donne la résistance à la température t de 1 mètre du conducteur. On coupe le fil exactement aux deux traits distants de 1 mètre et l'on pèse. On trouve, par exemple, un poids r grammes.

Dans la formule (a), faisons $l = 100$

$$r_0 = \frac{1}{c} \times \frac{10000}{p.\delta} \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2),$$

de là nous pouvons tirer c, puisque nous avons déterminé r_0, p, δ, t, et que α est connu.

Lorsque l'on doit essayer un grand nombre de fils de même diamètre, comme cela se présente souvent dans l'industrie, on détermine une fois pour toutes, la résistance d'une série de conducteurs de 1 mètre de longueur, fabriqués avec le même métal que celui des conducteurs à mesurer, l'opération se simplifie beaucoup parce que la résistance à mesurer et la résistance étalon étant formées du même métal, on ne doit plus tenir compte du coefficient de variation de la résistance avec la température, et comme r est très voisine de X (200) on peut se dispenser de faire usage des résistances R et s et la formule se réduit à $X = r \frac{\alpha}{\alpha'}$.

Pour faire ces mesures il faut opérer avec beaucoup de précautions, il faut attendre que les fils aient bien pris la température du local où l'on opère, il ne faut pas les toucher avec les doigts pendant que l'on fait l'essai. Il faut employer un galvanomètre assez sensible pour que l'on obtienne des déviations α et α' assez grandes sans qu'il soit nécessaire de recourir à une intensité de courant suffisante pour échauffer les fils d'une façon appréciable.

Le galvanomètre apériodique Deprez-d'Arsonval convient très bien pour ces essais, comme pile il est bon de faire usage d'un élément d'accumulateur. On fera varier l'intensité du courant d'après la résistance des fils à essayer et d'après la sensibilité du galvanomètre dont on fait usage.

208. **Mesure de la résistance d'un galvanomètre.** — Lorsque l'on dispose d'un second galvanomètre, on peut faire usage de l'une des méthodes indiquées pour la mesure des résistances.

Méthode de la demi déviation. — On met dans le même circuit le galvanomètre G (fig. 170) à essayer une pile p de résistance r et un rhéostat R, on donne à R une valeur R_1 telle que l'on obtienne une déviation d'environ 45°, puis on augmente R, jusqu'à une valeur R_2 telle que la déviation soit réduite à $\frac{45}{2} = 22,5$. On a alors :

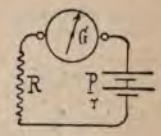


Fig. 170.

$$2\,(R_1 + G + r) = R_2 + G + r$$

d'où :

$$G = R_2 - 2R_1 - r.$$

Cette méthode n'est qu'approximative surtout si les déviations du galvanomètre ne sont pas tout à fait proportionnelles.

Méthode de Thomson. — On intercale le galvanomètre à essayer dans l'une des branches du pont de Wheatstone, et on met une clef K à l'endroit où se met d'ordinaire le galvanomètre (fig. 171). On fait varier R, jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre ne change pas, que l'on ouvre ou que l'on ferme la clef K, lorsque l'on arrive à ce résultat, c'est qu'aucun courant ne passe en CD. On a alors bR = aG d'où :

$$G = \frac{b}{a} R.$$

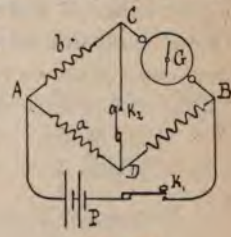


Fig. 171.

209. Mesure de la résistance intérieure d'une pile. — *Méthode de la demi déviation.* — Formons un circuit (fig. 172) composé de la pile P dont nous cherchons la résistance, d'un galvanomètre G et d'un rhéostat R.

Réglons la résistance du rhéostat de façon à avoir

une déviation d'environ 45° soit par exemple 46°.

Ensuite, augmentons la résistance de R de façon à réduire la déviation à la moitié de ce qu'elle était en premier lieu soit 23°, par conséquent notre rhéostat aura alors une résistance R′ plus grande et la résistance totale du circuit sera double de ce qu'elle était dans le premier cas, l'intensité du courant étant réduite de moitié.

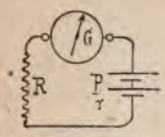


Fig. 172.

Nous avions d'abord comme résistance

$$R + G + P$$

La résistance est devenue :

$$R' + G + P = 2\,(R + G + P)$$

d'où $\quad P = R' - (2R + G).$

En divisant P par le nombre d'éléments, nous aurons la résistance intérieure d'un seul élément.

Exemple. — Prenons une pile de 7 éléments et un galvanomètre de 900 ohms.

Pour avoir une déviation de 46° nous devons intercaler une résistance R de 1890 ohms.

Pour ramener la déviation à 23° nous devons faire $R' = 4{,}700$ ohms.

Nous avons $P = 4{,}700 - (2 \times 1{,}890 + 900)$ d'où $P = 20$ ohms et la résistance d'un seul élément $r = \frac{20}{7}$ $= 2{,}857$ ohms soit en chiffres ronds 2,9 ohms.

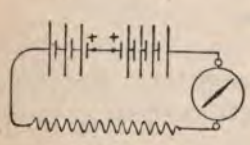


Fig. 173.

Si la force électromotrice des éléments est trop grande pour que l'on puisse maintenir la déviation du galvanomètre dans

les limites indiquées, on met une partie des éléments en opposition. Par exemple (fig. 173) on oppose 4 éléments à 6 autres de même nature la résistance totale est égale à la résistance des 10 éléments, mais il ne reste disponible que la force électro motrice de deux.

Méthode de Mance (fig. 174). — On place la pile à essayer dans la branche du pont de Wheatstone, où l'on met d'ordinaire la résistance à mesurer. On fait varier R jusqu'à ce que le galvanomètre conserve la même déviation que l'on ouvre ou que l'on ferme la clef K.

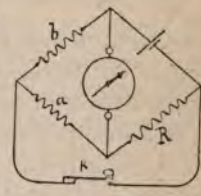


Fig. 174.

Dans ces conditions, on a : $P = \frac{b}{a} R$.

Par exemple si $\frac{b}{a} = 0.01$ et $R = 200$

$P = 0.01 \times 200$ d'où $P = 2$ ohms.

Méthode par la chute de potentiel à circuit fermé. — Cette méthode est très rapide et d'un usage très commode dans le laboratoire.

On doit employer un galvanomètre apériodique Deprez d'Arsonval, à miroir, disposé pour servir de Voltmètre (211). Supposons que la résistance intercalée soit telle que le galvanomètre dévie de 100 divisions de l'échelle pour 1 Volt de différence de potentiel aux bornes. Dans ces conditions un galvanomètre de 250 ohms exige une résistance extérieure de 10,000 ohms environ. Si l'on s'en sert pour mesurer la force électro motrice d'un élément de pile ordinaire, on peut admettre que celui-ci est à circuit ouvert (130), l'erreur est absolument négligeable dans la pratique. Je suppose que l'on

CHAPITRE XVII

DE L'INDUCTION

211. **Phénomènes fondamentaux.** — Les phénomènes d'induction ont été observés par Faraday dès 1831, mais les lois qui régissent ces phénomènes, ont été établies par le physicien russe Lenz, en 1833.

Prenons deux conducteurs placés parallèlement l'un à l'autre, AB et A'B' (fig. 176). Le premier AB, faisant

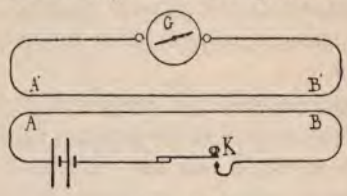


Fig. 176.

partie d'un circuit ABPK contenant une pile P et un interrupteur K ; le second A'B' faisant partie de A'B'G dans lequel est intercalé le galvanomètre G. *On observera que chaque fois que l'on établit le courant dans* AB *en fermant la clef* K, *le galvanomètre* G *décèle le passage d'un courant dans* A'B', de sens contraire à celui qui parcourt AB son aiguille dévie dans un certain sens, par exemple vers la droite. Mais cette déviation n'est que momentanée, l'aiguille du galvanomètre revient au zéro et demeure fixe aussi longtemps que le courant reste établi dans AB. Au moment où nous ouvrons K, *le galvanomètre* G *dévie de nouveau, mais cette fois vers la gauche,* A'B' *est*

210. Détermination de la valeur industrielle d'une pile. – Lorsque l'on veut se rendre compte de la valeur d'une pile il faut lui faire faire un travail analogue à celui qu'elle devra produire dans la pratique. Si la pile est destinée à faire fonctionner des sonneries ou des appareils télégraphiques, il faut fermer son circuit au moyen, par exemple, d'une sonnerie trembleuse qui interrompra et rétablira rapidement le courant. Il faut faire en sorte que le courant débité par la pile ait à peu près l'intensité qu'elle devra avoir dans la pratique. On mesure de temps en temps la force électro-motrice et la résistance intérieure, la pile la meilleure sera naturellement celle dont la force électro-motrice restera la plus grande et la résistance intérieure la plus petite pendant le temps le plus long.

Si la pile est destinée aux usages de la téléphonie, il faut maintenir le courant fermé pendant un certain temps, 5 minutes par exemple, sur une résistance de 10 ohms environ, correspondant à la résistance du circuit primaire d'un microphone. Ensuite on laisse le circuit ouvert pendant le même temps pour donner à l'élément le temps de se dépolariser. On mesure à intervalles réguliers la force électromotrice à circuit ouvert et à circuit fermé. Au bout d'un certain temps on peut ainsi arriver à se rendre compte de la valeur de la pile.

Dans l'appréciation il faudra naturellement tenir compte du coût des composants et de la facilité plus ou moins grande d'entretien.

Lorsque les deux circuits primaire et secondaire sont parcourus par des courants, il se produit entre eux des attractions ou des répulsions suivant que les courants sont de même sens ou de sens contraire. Ces actions sont régies par la *loi de Lenz : Tout déplacement relatif d'un circuit fermé et d'un courant développe dans le premier des courants induits dirigés de telle façon qu'ils tendent toujours à s'opposer au mouvement.*

Intercalons dans le circuit primaire un rhéostat que nous puissions faire varier très rapidement, nous constaterons que chaque fois que nous augmentons l'intensité du courant primaire, il se produit un courant induit inverse et vice versa.

Les courants de durée extrêmement courte, produits par la décharge d'une bouteille de Leyde à travers un conducteur donnent également lieu à des courants induits dans les circuits voisins.

212. **Action des corps conducteurs et magnétiques.** — Si nous séparons les deux circuits primaire et secondaire par des corps isolants, tels que du bois, du caoutchouc, de la gutta-percha, nous ne verrons aucune différence dans l'intensité des phénomènes d'induction.

Mais si nous intercalons un corps conducteur, par exemple une feuille de cuivre épaisse, les phénomènes d'induction seront fortement diminués; et si nous intercalons une tôle épaisse en fer doux, les phénomènes d'induction seront totalement supprimés.

213. **Induction par les aimants.** — Prenons une bobine creuse A (fig. 178*a*) et fermons le circuit de cette bobine à travers le galvanomètre G.

Prenons un barreau aimanté et introduisons-le dans la bobine, nous produirons un courant induit de courte

durée. En retirant le barreau nous obtiendrons de nouveau un courant induit mais de sens contraire.

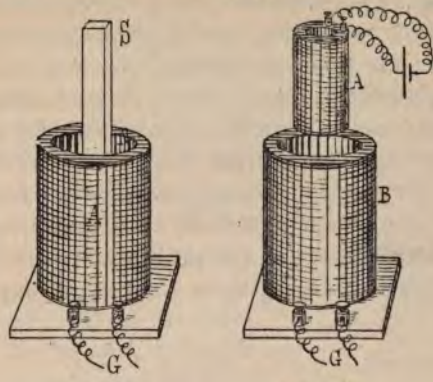


Fig. 178*a*. Fig. 178*b*.

Si nous répétons la même expérience, mais en retournant le barreau, nous observons des courants de sens contraire à ceux que nous venons d'obtenir.

Un changement dans la position relative de l'aimant et de la bobine secondaire a donc pour effet de déterminer dans celle-ci des courants induits.

Si nous faisons l'expérience au moyen d'une bobine creuse A (fig. 178*b*), formant circuit primaire pénétrant dans le circuit secondaire B, nous constaterons que les effets obtenus seront beaucoup plus énergiques en mettant un barreau de fer doux à l'intérieur de la bobine A.

Si nous nous reportons au chapitre de l'électro-magnétisme, nous voyons que A constitue un solénoïde, que ce solénoïde produit un champ magnétique beaucoup plus intense si nous plaçons un barreau de fer doux à l'intérieur.

Jetons un coup d'œil sur les expériences que nous venons de décrire, nous voyons que les phénomènes d'induction sont intimement liés aux phénomènes magnétiques produits par les courants et par les aimants.

Chaque fois qu'un conducteur se trouve dans un champ magnétique, que ce champ soit produit par un courant ou par un aimant permanent, le conducteur devient le siège d'un courant dès qu'il y a changement soit dans l'intensité du champ, soit dans la position relative du champ magnétique et du circuit métallique.

214. **Considérons le cas d'un pôle d'aimant.** — De ce pôle (fig, 179), partent des lignes de force qui rayonnent dans

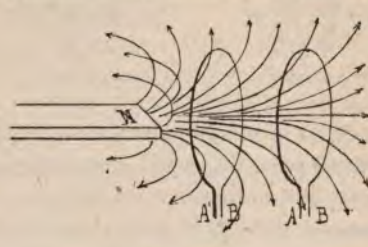


Fig. 179.

toutes les directions de l'espace, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pôle, elles divergent de plus en plus, de sorte que si nous considérons un circuit métallique AB, dont le plan est perpendiculaire à l'axe de l'aimant, et si nous le faisons passer de la position AB à la position A'B', dans cette seconde position il interceptera un nombre de lignes de force beaucoup plus considérable que dans la première. Pendant le passage de AB en A'B' ce conducteur sera le siège d'un courant.

Chaque fois qu'un conducteur se trouve dans un champ

magnétique, tout changement dans le nombre de lignes de force interceptées par ce conducteur donne lieu à une force électro-motrice dont la grandeur dépend du changement dans le nombre de lignes de force magnétiques.

Prenons le cas d'un champ magnétique uniforme par conséquent dont toutes les lignes de force sont parallèles, et équidistantes (fig. 180), le champ magnétique de la terre en un lieu déterminé, par exemple.

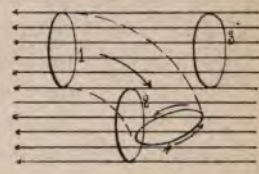


Fig. 180.

Si nous prenons un circuit circulaire 1, si nous le transportons en 2 ou en 3 en le maintenant toujours parallèlement à lui-même, il n'y aura aucun courant engendré, le nombre de lignes de force qui traversent le circuit étant toujours le même, mais il n'en sera plus ainsi lorsque par un mouvement de rotation nous l'amènerons en 4. Dans cette position le nombre de lignes de force qui le traversent est moindre qu'en 1, et nous obtiendrons un courant.

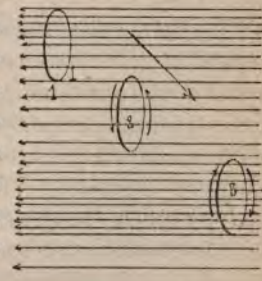


Fig. 181.

Si nous prenons maintenant un champ magnétique variable (fig. 181), nous obtiendrons des courants induits même en transportant l'anneau parallèlement à lui-même, car le nombre de lignes de force interceptées n'est pas le même dans les positions de 2 et 1, ni en 2 et 3.

C'est sur ces phénomènes

qu'est basé le fonctionnement des machines dynamo-électriques.

215. **Examinons le cas de l'induction par les courants.** — Soit AB (fig. 182), le circuit primaire parcouru par un courant et A'B' le circuit secondaire ; le courant primaire donne naissance à un champ magnétique et nous avons vu qu'au point de vue de l'action extérieure un courant peut être assimilé à un aimant ; tout ce que nous avons dit de l'induction par les aimants s'applique à l'induction par un courant.

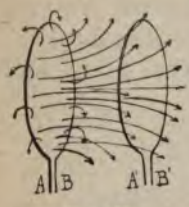


Fig. 182.

La grandeur de la force électromotrice créée dans le conducteur induit, est proportionnelle à la variation du nombre de lignes de force composées par ce circuit. Si au lieu de prendre une seule spire pour le circuit secondaire, on prend deux spires, les forces électromotrices induites dans chacune d'elles étant de même sens s'ajoutent et l'intensité du courant induit dépend de la force électromotrice engendrée et de la résistance électrique du circuit.

216. **Cas le plus simple d'induction électro-magnétique.** — Supposons que nous ayons un champ magnétique uniforme et qui par conséquent peut être représenté par des lignes de force parallèles et équidistantes.

Dans un plan perpendiculaire à ces lignes de force, placez un conducteur A B C D formé d'une forte barre de cuivre repliée à angles droits (fig. 183). Le plan de ce conducteur coupera les lignes de force aux points A. Plaçons transversalement à AB et CD une autre barre EF mobile, que nous ferons glisser parallèlement à elle-même dans le sens de la flèche en l'appuyant sur les

deux premières. Dans la position EF, EBCF intercepte un certain nombre de lignes de force ; si la barre EF se meut d'un mouvement uniforme, le nombre de lignes de

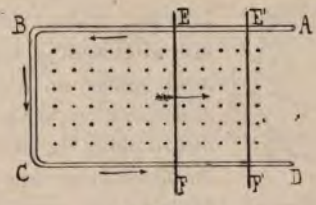


Fig. 183.

force interceptées augmentera d'une quantité constante dans l'unité de temps, et la force électromotrice engendrée aura une valeur constante.

Si le champ magnétique a une intensité égale à l'unité, EF ayant 1 centimètre de longueur et se mouvant dans le champ avec une vitesse de 1 centimètre à la seconde, *la force électromotrice engendrée sera égale à l'unité absolue ;* nous avons vu que le Volt vaut 100 millions de fois cette unité absolue. Pour que la force électromotrice du courant induit dans les conditions que nous venons d'indiquer fut égale à 1 Volt, il faudrait faire mouvoir EF avec une vitesse de 100 millions de centimètres ou 1 million de mètres à la seconde.

223. **Self-Induction extra-courant.** — Pour qu'il y ait une force électromotrice induite, il n'est pas nécessaire que le circuit secondaire soit fermé ; lorsqu'un point quelconque d'un conducteur est soumis à l'induction, il y a une force électromotrice créée en ce point et il y a déplacement d'électricité vers ceux où le potentiel est moins élevé.

Considérons ce qui se passe dans un conducteur simple. Soit un conducteur AB enroulé en spirale (fig. 184), lorsque l'on envoie un courant à travers ce conducteur, il ne s'établit pas instantanément, ainsi le potentiel a déjà acquis une certaine valeur en *a*, alors qu'il est encore nul en *b*; le courant en *a* induit dans la portion voisine *b* du conducteur une force électromotrice de sens contraire qui vient en déduction de celle du courant principal; cette force électromotrice induite dure tant que le potentiel en *a* a atteint sa valeur normale; pendant une période de très faible durée, elle a donc pour effet de diminuer l'intensité du courant et de retarder le moment où il atteindra sa valeur maximum.

Fig. 184.

Lorsque l'on interrompt le courant au contraire, la force électromotrice induite a le même sens que celle qui produit le courant principal et tend à prolonger la durée de celui-ci.

Le même phénomène se produit mais avec moins d'intensité sur un conducteur rectiligne.

Ces effets d'induction du conducteur sur lui-même portent généralement le nom de *self-induction* ou induction propre. Ils sont analogues à ce que l'on appelle inertie en mécanique; de même que l'on ne peut mettre instantanément un corps pesant en mouvement, ou le remettre au repos lorsqu'on lui a donné une certaine vitesse; de même on ne peut produire ou interrompre le courant électrique d'une façon absolument instan-

tanée. C'est pourquoi on donne quelquefois le nom d'*inertie électrique* à l'induction propre.

Quand on jette une pierre dans de l'eau tranquille, les ondes se propagent petit à petit et ne cessent qu'au bout d'un certain temps, de même si l'on envoie un courant dans un conducteur droit, les lignes de force magnétiques ne s'établissent ou ne cessent qu'après un certain temps très court, il est vrai, mais cependant appréciable.

Ces phénomènes peuvent être rendus très visibles par l'expérience suivante :

Entre deux points A et B pris sur le circuit d'une pile et d'un électro-aimant R (fig. 185) plaçons un galvanomètre G. Le courant étant établi d'une façon permanente, va faire dévier G d'un angle α.

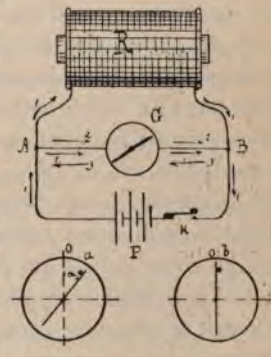


Fig. 185.

Plaçons en *a* un buttoir qui maintienne l'aiguille à la déviation α et qui l'empêche de retourner au zéro, établissons le courant en fermant K, la force électromotrice produite par la *self-induction* de la bobine va produire dans la dérivation un courant dont le sens est indiqué par les flèches 2 et qui vient s'ajouter au courant principal 1. L'aiguille du galvanomètre déviera donc au delà de α.

Le courant qui produit cette déviation s'appelle *extra-courant de fermeture*.

Plaçons maintenant un arrêt *b* qui maintienne l'aiguille

du galvanomètre au zéro et interrompons le courant en K, la self induction de la bobine donne lieu à un courant dont le sens dans la déviation est indiqué par la flèche 3 et qui fait dévier l'aiguille du galvanomètre au-delà du zéro.

Ce courant s'appelle l'*extra-courant d'ouverture*.

Lorsque l'on a affaire à des courants de haute tension parcourant des électro-aimants, comme il arrive dans les machines dynamos destinées au transport de la force, il ne faut jamais interrompre brusquement le courant, parce que la force électromotrice de l'extra-courant pourrait être telle que la différence de tension entre les diverses spires des électro-aimants devienne assez grande pour que l'électricité se fraie un chemin à travers l'isolant, en détériorant les bobines.

On peut comparer les effets qui se produisent lors de la fermeture et de l'ouverture d'un circuit à ce qui se passe dans un bélier hydraulique par exemple.

A partir du moment où le courant d'eau est établi, en vertu de l'inertie de l'eau; il faut un certain temps pour que la vitesse atteigne son régime, lorsque l'on interrompt brusquement l'écoulement, l'inertie de l'eau produit un choc violent qui peut élever une partie du liquide à une hauteur plus grande que la hauteur motrice, et qui briserait le tuyau si aucun moyen d'écoulement n'était ménagé.

On peut représenter par un diagramme les phénomènes de Self-induction qui se passent dans une bobine; portons sur une droite OC (fig 186), des longueurs proportionnelles aux temps et sur des perpendiculaires telles que O'A', des longueurs proportionnelles aux intensités du courant au moment déterminé. Si le point O indique

le moment de la fermeture du circuit, le courant aura une valeur variable pendant un certain temps OO′ au bout duquel sa valeur atteindra son intensité normale

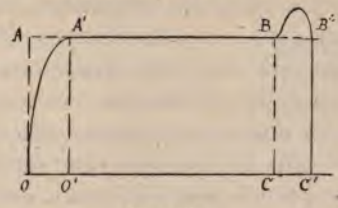


Fig. 186.

O′A′ qui restera constante pendant le temps O′C. Au moment qui correspond à C, si l'on coupe le circuit, la force électro-motrice ira en augmentant et il y aura encore courant pendant un intervalle CC′. Ainsi que nous le verrons plus loin, ces extra-courants ont une très grande importance dans les machines dynamo-électriques et en télégraphie.

Dans le cas de conducteurs rectilignes par lesquels on envoie des courants variables, comme c'est le cas en télégraphie ou en téléphonie, la self-induction a pour effet de retarder la propagation de ces courants. Il résulte des expériences du professeur Hughes, que la propagation est d'autant plus rapide que le métal est moins magnétique; le fer a un coefficient de self-induction beaucoup plus élevé que le cuivre ou le bronze; aussi pour les lignes de grande longueur où l'on fait usage d'appareils qui envoient des courants qui se suivent à des intervalles de temps extrêmement courts, comme les Baudots, les Wheatstone, etc., ou pour les communications téléphoniques on doit faire usage de conducteurs en métal non magnétique, cuivre ou bronze.

Cas des paratonnerres. — Ce que nous venons de dire s'appliqué à des courants faibles, mais lorsqu'il s'agit d'évacuer dans un temps tellement court que l'on pourrait dire presque instantanément, de grandes quantités d'électricité, comme dans le cas de décharge de fortes batteries de Leyde, lors des décharges atmosphériques, il résulte des expériences de Melsens, confirmées par celles plus récentes du docteur Lodge, que l'inertie électrique du cuivre est plus grande que celle du fer et qu'une forte décharge s'écoule plus facilement à travers un conducteur en fer.

Ce fait démontré expérimentalement par Melsens, avait toujours été considéré comme un paradoxe. Il est aujourd'hui mis hors de doute.

C'est pour cette raison que les conducteurs en fer doivent être préférés pour les paratonnerres.

224. **Expérience d'Arago.** — En 1824, Arago observa que si l'on imprime à un disque métallique A (fig. 187), un mouvement de rotation rapide au moyen d'une courroie B, si l'on recouvre le disque d'une plaque de verre destinée à empêcher le mouvement de l'air, un barreau aimanté NS, placé sur un pivot, se met en mouvement et suit le disque dans son mouvement de rotation. L'action sur l'aimant est presque nulle, lorsque au lieu d'un disque plein, on emploie un disque dans lequel on a pratiqué des traits de scie suivant des rayons et allant jusque près du centre.

Fig. 187.

Quand on remplace le cuivre par du bois, du verre ou un autre corps non conducteur, l'action sur l'aimant est absolument nulle.

225. **Courants de Foucault.** — Lorsque l'on fait tourner le disque de métal entre deux pôles d'aimants puissants (fig. 188), le disque s'échauffe fortement lorsqu'il est plein, et il faut dépenser un travail considérable pour le maintenir en mouvement. Quand on emploie un disque fendu suivant des rayons, l'effet est presque nul, comme dans l'expérience d'Arago.

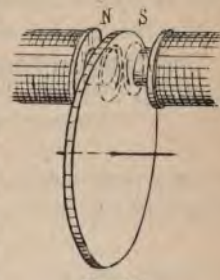


Fig. 188.

Ces effets sont dus à des courants induits circulaires qui prennent naissance dans le disque métallique plein; dans le cas de l'expérience de Foucault, en vertu de la loi de Lenz ces courants induits ont pour effet de s'opposer au mouvement; comme la résistance électrique du disque est très faible, les courants acquièrent une intensité très grande et échauffent le métal. Tout le travail dépensé pour faire tourner le disque est transformé en chaleur, comme dans le cas du frottement.

Dans l'expérience d'Arago, le disque tournant dans le champ de l'aimant NS devient aussi le siège de courants qui auraient pour effet d'empêcher son mouvement, mais comme l'aimant est mobile, ses pôles sont attirés dans le sens du mouvement par suite de l'action électro-magnétique.

Quand on remplace le disque plein par un autre, présentant des solutions de continuité, le parcours des courants est considérablement augmenté et leur intensité est réduite. L'effet est absolument nul sur les corps non conducteurs.

On donne le nom de *courants de Foucault* à ces courants

induits se produisant dans des masses métalliques qui se meuvent dans un champ magnétique, parce que c'est ce savant qui le premier a indiqué la relation qui existe entre le travail absorbé pour produire le mouvement et la quantité de chaleur produite dans la pièce mobile.

Nous aurons à revenir sur ce point à propos des machines dynamo-électriques.

CHAPITRE XVIII

DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

MACHINES A COURANT CONTINU

226. — On appelle *machines dynamo-électriques* des appareils qui servent à transformer l'énergie mécanique en courant électrique.

Le fonctionnement des machines dynamo-électriques repose sur les phénomènes d'induction. Dans les machines dynamo-électriques proprement dites, le courant est produit par le mouvement d'un conducteur à travers un champ magnétique produit par un électro-aimant. Quand ce champ est celui d'un aimant permanent, ces machines s'appellent magnéto-électriques.

227. **Machine élémentaire. — Machine disque de Faraday.** — La machine dynamo-électrique la plus simple, est constituée par le dispositif représenté figure 183, dans lequel le champ magnétique inducteur est celui de la terre.

Faraday a donné à l'expérience une forme plus commode, il faisait tourner un disque métallique entre les pôles d'un aimant, figure 189. Un frotteur *a* s'appuyant sur l'axe et un autre sur la périphérie. Par la rotation du disque, on obtient un courant continu dans le galvanomètre G. Le disque coupe normalement les lignes de force magnétique, et si nous considérons un rayon *ac* dans son mouvement, le nombre de lignes de force interceptées par *c a* G *b* va en diminuant jusqu'en *b*, ce circuit devient donc le siège d'une force électromotrice.

On pourrait donc faire remonter à Faraday l'invention de la machine dynamo-électrique.

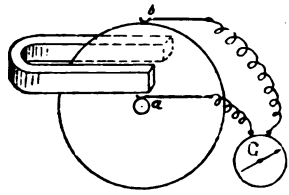


Fig. 189.

228. — Pour constituer une machine dynamo-électrique, il nous faut donc :

a) Un système de conducteurs mobiles dans un champ magnétique et disposés de façon que l'on puisse recueillir le courant produit. — Cette partie de la machine porte le nom d'*Induit*.

b) Un champ magnétique puissant, que l'on appelle l'*Inducteur*.

229. *a*) **L'INDUIT.** — Les induits de toutes les machines dynamo-électriques existantes peuvent se rapporter à deux types principaux : l'*anneau Gramme* et l'*induit en tambour* de Siemens.

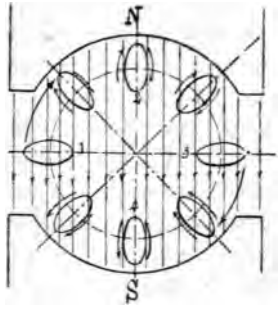


Fig. 190.

230. **Anneau Gramme.** — Considérons un champ magnétique produit par deux pôles de noms contraires, placés en face l'un de l'autre (fig. 190), et imaginons un conducteur circulaire animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe 0 situé dans son plan;

le sens de mouvement étant indiqué par la flèche. Pour plus de simplicité, supposons d'abord que les lignes de force sont toutes parallèles et que le champ est uniforme.

Dans la position 1, cette spire coupe le nombre maximum de lignes de force qu'elle peut intercepter; ce nombre ira en diminuant depuis 1 jusqu'en 2, où il sera minimum.

Une force électromotrice croissante, depuis 1 jusque 2, sera engendrée dans ce conducteur et il en résultera un courant.

Si l'on examine le sens de ces courants dans les diverses positions, on verra que de la position 1 à 2 (fig. 191), la force électromotrice va en augmentant, que de 2 à 3 elle va en diminuant pour devenir zéro dans cette dernière position. Le sens du courant déterminé dans la spire est le même depuis 1 jusque 3 en passant par 2. En 3, la force électromotrice passe par zéro pour passer par un maximum en 4 et revenir à zéro en 1. Depuis 3 jusque 1, en passant par 4, le courant est de sens contraire à celui de 1 jusqu'en 3.

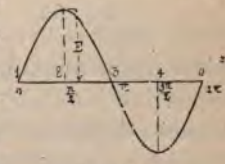


Fig. 191.

La force électromotrice et par conséquent le courant dans le conducteur sont nuls lorsque celui-ci est traversé par le nombre maximum de lignes de force.

Supposons maintenant que nous ayons deux spires de fil dans le même champ magnétique, réunies à un commutateur disposé comme l'indique la fig. 192; c'est-à-dire les deux conducteurs étant mis en communication avec deux segments métalliques *a* et *b*, isolés l'un de l'au-

tre. Sur ces deux segments appuient les frotteurs *d* et *e* par lesquels le courant peut s'écouler.

Si les frotteurs *d*, *e* n'existaient pas, les courants des deux

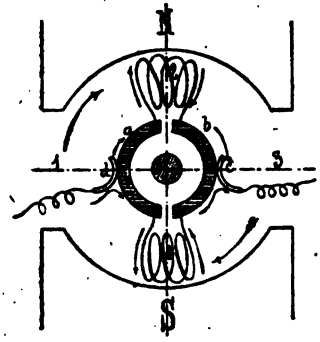


Fig. 192.

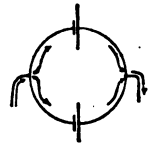


Fig. 193.

spires de fil s'annuleraient, tandis qu'en employant la disposition indiquée, les deux spires agissent comme des éléments de pile accouplés en quantité (fig. 193), et leurs courants s'ajoutent dans le circuit général.

Le diagramme donnant les intensités du courant pour les diverses positions sera représenté par la fig. 194 ci-contre. Une telle machine donnerait dans le circuit extérieur une série d'impulsions toujours dans le même sens.

Si au lieu de 2 spires, nous en avions 4 placées à angle droit, avec 4 sections au commutateur, quand l'une des paires se trouverait dans la position où le courant est nul, l'autre serait traversée par le courant maximum. Pour l'une des paires de spires on aurait le diagramme *a b c d e f g* (fig. 195), pour l'autre paire, *a' b' c' d' e' f'*, etc. Le diagramme résultant serait obtenu en faisant la somme

des ordonnées des 2 diagrammes partiels, et l'on obtiendrait la courbe ABCD.

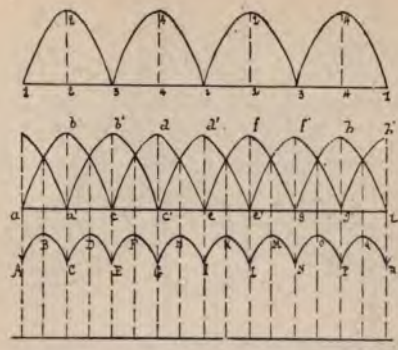


Fig. 194 et 195.

Si au lieu de 4 sections on en avait un plus grand nombre, 8, par exemple, les ondulations seraient encore réduites de moitié.

Plus on augmentera le nombre de sections, plus le courant se rapprochera de la continuité.

Une machine constituée comme nous venons de l'indiquer n'utiliserait qu'une faible partie au champ magnétique, car les lignes de force sont loin d'aller directement d'un pôle à l'autre, en outre il y a un moyen de faire varier dans de plus grandes proportions le nombre de lignes de force coupées, et cela en plaçant à l'intérieur des conducteurs mobiles un anneau en fer doux, qui a pour effet de concentrer le plus grand nombre possible de lignes de force à l'intérieur du conducteur (fig. 196).

Les sections du fil induit sont enroulées autour de cet anneau en fer doux, et sur l'axe du système est calé le

commutateur formé d'autant de lames de cuivre isolées les unes des autres qu'il y a de sections dans l'anneau.

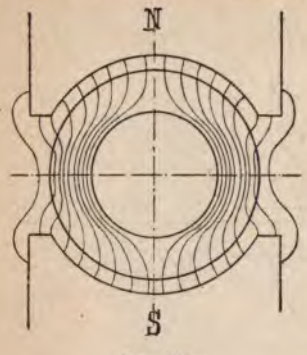


Fig. 196.

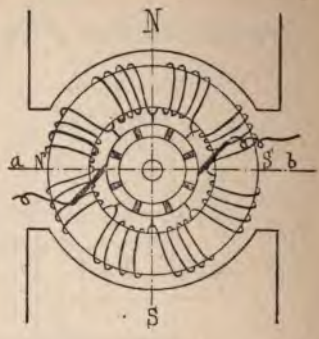


Fig. 197.

La fin de chaque section et le commencement de la section suivante sont réunies à une lame du commutateur (fig. 197). Le fil de l'induit est donc continu électriquement (fig. 198). La moitié du courant total parcourt chacune des moitiés de l'anneau. Ces courants peuvent s'écouler par les frotteurs ou balais qui viennent appuyer sur le collecteur.

Fig. 198.

Le système d'induit que nous venons de décrire est l'*anneau de Gramme*.

231. **Induit Siemens ou induit en tambour.** — Au lieu de prendre un conducteur circulaire se déplaçant dans un champ magnétique, comme nous l'avons fait précédemment (244, fig. 190), faisons tourner un conducteur *abcd*, ayant la forme d'un cadre rectangulaire, autour de l'axe AB (fig. 199). Dans la position verticale, le cadre intercepte le plus grand nombre de lignes de force possible,

pendant le premier quart de tour, le nombre de ces lignes va en diminuant jusqu'à zéro. Le conducteur est

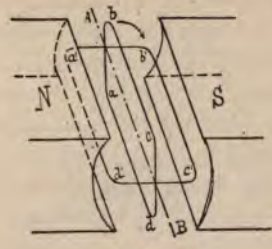


Fig. 199.

le siège d'une force électromotrice qui va en augmentant jusqu'à une valeur E (fig. 200), puis en diminuant pendant le second quart de tour pour être nulle après demi-tour. Pendant le second demi-tour, la force électromotrice est de sens inverse, comme nous l'avons vu précédemment. Dans ces conditions le conducteur mobile serait donc parcouru par des courants alternatifs.

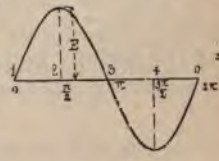


Fig. 200.

Nous pouvons également obtenir des courants continus; pour cela supposons que les extrémités du cadre soient soudées à deux demi-cylindres métalliques A et B isolés de l'axe (fig. 201), qui forment ce que l'on appelle le commutateur ou collecteur. Lorsque le cadre est placé verticalement, le demi-cylindre A vient en contact avec le ressort D, et B avec C, et cela au moment où la force électromotrice change de sens; par conséquent le conducteur est toujours parcouru par des courants de

même sens, comme dans le cas de l'anneau Gramme (fig. 197).

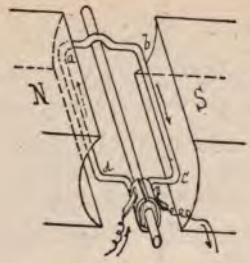


Fig. 201.

Pour obtenir un courant continu et non pas une série d'impulsions, il faut multiplier les sections du collecteur et le nombre des bobines rectangulaires partielles, de façon que les forces électromotrices partielles s'ajoutant on obtienne un courant qui puisse être considéré comme

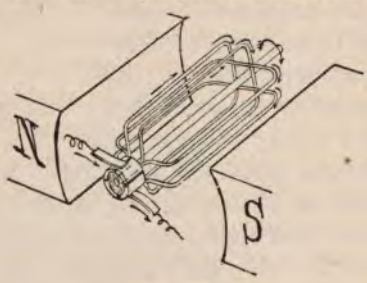


Fig. 202.

étant continu. La figure 202 représente un induit Siemens ou un tambour à quatre sections.

Le nombre des sections varie avec la force électromo-

trice que doivent fournir les machines ; ainsi pour une machine Gramme, type d'atelier donnant une force électromotrice d'environ 70 Volts, ce nombre est de 60.

Dans les machines genre Siemens comme dans celle du type Gramme, l'espace compris à l'intérieur du tambour constitué par les conducteurs mobiles est rempli par une masse de fer doux qui a pour but de concentrer les lignes de force du champ magnétique.

232. **Effets des courants de Foucault sur le fer doux des induits.** — Le fer doux placé à l'intérieur des induits soit du système Gramme, soit du système Siemens ne peut pas être constitué par une masse d'une seule pièce. A cause du mouvement de rotation dont il est animé, ce fer doux est traversé en chaque point par un flux magnétique qui varie à chaque instant pour un point déterminé de la masse et si celle ci était continue elle s'échaufferait fortement par suite des courants de Foucault qui s'y développeraient. D'où perte considérable d'énergie et destruction rapide de la machine.

Pour éviter cet inconvénient, Gramme constitue le fer doux de son anneau par un fil de fer isolé au moyen de coton enduit de bitume de Judée, et enroulé de façon à former une couronne ; le plan des spires est perpendiculaire à l'axe de rotation, de sorte qu'il ne s'y développe pas de force électromotrice.

Dans les machines Schuckert, dont l'induit est analogue à celui de Gramme, le fer doux est formé par des anneaux en tôle mince, séparés par un isolant et assemblés au moyen de rivets en bronze isolés électriquement des lames en tôle.

Le fer doux des induits employés dans les machines Siemens, Edison, etc., est également constitué par des

tôles minces isolées les unes des autres, et placées perpendiculairement à l'axe de rotation.

Il faut veiller à ce que les rivets ou les boulons qui réunissent toutes ces tôles entre elles soient isolés électriquement, de façon qu'il ne puisse se former de circuit fermé électriquement à l'intérieur du fer doux; parce que ce circuit deviendrait le siège de courants alternatifs d'autant plus intenses que sa résistance serait plus petite.

233. **CHAMP MAGNÉTIQUE.** — Dans les premières machines dynamo-électriques de Pixii, de Clarke, de Wilde, de l'Alliance, le champ magnétique était constitué par des aimants permanents. Pour arriver à produire des champs suffisamment intenses, on était conduit à faire usage d'aimants en acier extrêmement lourds, aussi n'a-t-on guère fait usage de ce genre d'aimants dans les machines destinées à produire des courants de grande intensité.

La machine de l'Alliance, de Van Marum, est cependant encore employée dans quelques phares, et on recommande encore aujourd'hui l'emploi des machines à aimants permanents de de Meritens pour le même usage, et cela à cause de la constance du champ produit, ce qui donne une sécurité plus grande qu'avec les machines dynamo-électriques plus ou moins sujettes à certains accidents, notamment les changements de polarité. Cependant depuis que l'on connaît mieux les phénomènes magnétiques qui se passent dans les électro-aimants, on a pu parer à ces accidents, et les machines magnéto-électriques disparaissent peu à peu, elles ne sont plus guère utilisées que sous de petites dimensions dans les appareils téléphoniques, médicaux, etc.

On appelle machines dynamo-électriques, celles dans lesquelles le champ magnétique est produit par des

électro-aimants dont le courant est emprunté à la machine elle-même, ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

Il y a un très grand nombre de variétés dans la forme des champs magnétiques, nous allons passer en revue les principales.

La figure 203 représente le champ magnétique de la machine Gramme primitive ; il se compose de deux électro-aimants disposés de telle façon que leurs pôles de même nom soient en contact de manière à donner lieu en N et S à des pôles conséquents.

Les noyaux des électro-aimants sont en fer doux, les culasses et les pièces polaires en fonte. La forme primitive de l'inducteur Siemens est indiquée par la figure 204, elle ne diffère pas essentiellement de la précédente, elle doit être appropriée à la forme spéciale de l'induit auquel elle est destinée.

M. Schuckert de Nuremberg, a modifié la forme de l'anneau Gramme, il lui a donné un diamètre beaucoup plus grand et une forme plus aplatie ; l'inducteur est formé de deux électro-aimants en fer à cheval dont les pôles de même nom sont en regard l'un de l'autre sans avoir de points de contact (fig. 205).

Une autre variante nous est montrée par la figure 206. Cette forme est employée dans plusieurs modèles de machines construites en Angleterre du type dit *Manchester*.

M. Edison a employé un système d'inducteur qui diffère assez notablement des précédents, il est composé d'un électro-aimant en fer à cheval, à culasse et noyaux en fer doux, les pièces polaires sont en fonte (fig. 207). L'électro-aimant est fixé sur le bâti en fonte qui porte la machine, avec interposition d'une plaque en zinc A, qui

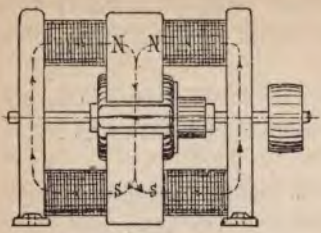


Fig 203

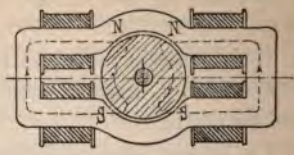


Fig 204

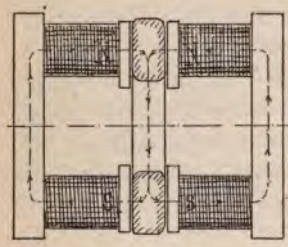


Fig 205

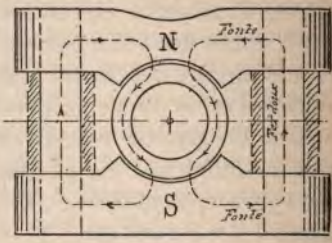


Fig 206

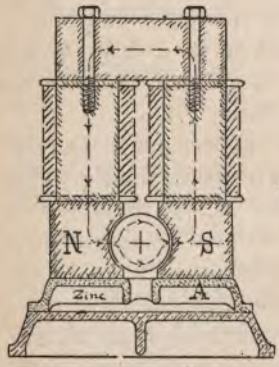


Fig 207

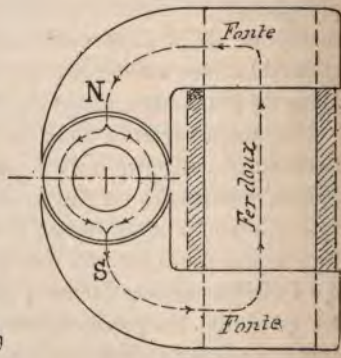


Fig 208

a pour but d'isoler magnétiquement les pôles de l'aimant, de façon que les lignes de force ne soient pas dérivées à travers le bâti.

L'inducteur formé d'un électro-aimant simple est beaucoup employé aujourd'hui, on lui donne un grand nombre de dispositions différentes, dans beaucoup de machines et notamment dans le dernier modèle de Gramme, appelé type supérieur, c'est le bâti qui forme la culasse de l'électro-aimant.

Parmi les principales dispositions de champs magnétiques employés, nous citerons encore celle dans laquelle on fait usage d'une seule bobine droite terminée par deux pièces polaires courbes N et S (fig. 208) qui embrassent l'induit, et enfin la disposition employée par M. Lahmeyer, d'Aix-la-Chapelle (fig. 209), les bobines de l'électro-aimant se trouvent à l'intérieur d'une espèce de cage en fonte. En principe cette disposition est la même que celle de l'inducteur de la machine Thompson-Houston (fig. 210), dans laquelle, les bobines de l'électro-aimant

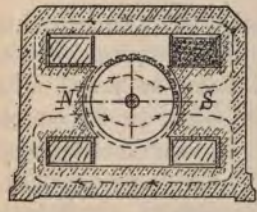


Fig. 209.

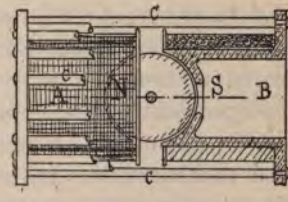


Fig. 210.

sont également enroulées sur des pièces polaires en fonte A et B, mais le circuit magnétique est fermé extérieurement par des barreaux en fer rond C.

234. **Machines à pôles multiples.** — Nous avons vu que la

force électromotrice engendrée dans chaque section de l'anneau va en augmentant depuis la ligne neutre jusqu'à la ligne qui réunit les pôles, il y a donc une partie du parcours pendant laquelle chaque spire ne fournit presque pas de force électromotrice et agit presque comme une résistance inerte. En vue d'obtenir une plus grande puissance pour un poids déterminé, on construit des machines dynamo-électriques dont le champ magnétique comprend 4, 6, 8 pôles et plus, on réduit ainsi l'espace à parcourir par les sections de l'anneau pour passer de la ligne neutre à la position où la force électro motrice est maximum. Seulement cette disposition ne peut être employée que pour les machines de grandes dimensions; elle convient surtout pour les anneaux plats genre Schuckert, parce que on peut leur donner un plus grand diamètre qu'aux anneaux Gramme ou aux induits en tambour.

Pour les petites machines la complication des organes compense et au delà la petite économie que l'on pourrait faire sur le poids de la machine.

La figure 211 représente schématiquement une machine à quatre pôles. Comme la force électromotrice dans chaque section change quatre fois par tour, il faut employer deux paires de balais, que l'on peut accoupler soit en tension, soit en quantité, de façon à obtenir une force électromotrice double de celle d'une machine à deux pôles ayant les mêmes dimensions, ou bien les accoupler en quantité de façon à avoir une intensité plus grande.

Comme il importe de diminuer autant que possible le nombre des balais qui demandent de l'entretien et de la surveillance, et qui constituent l'une des parties les plus

délicates de la machine dynamo-électrique, on a cherché une disposition qui permette de supprimer deux de ces organes.

Quand il s'agit de machines devant donner des cou

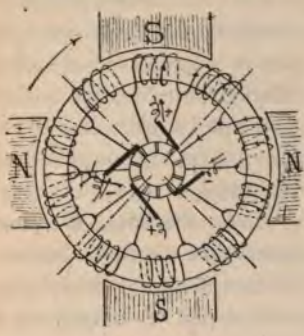


Fig. 211.

Fig. 212.

rants de haute intensité, on emploie la disposition représentée par la figure 212, et qui consiste simplement à réunir deux à deux les sections diamétralement opposées du collecteur. Il suffit alors d'employer deux balais placés sur deux rayons perpendiculaires entre eux. Il est facile de voir en suivant la marche des courants que cette disposition revient à celle des quatre balais réunis en quantité deux par deux.

Lorsque l'on veut obtenir une tension élevée il faut employer la disposition Andrew (fig. 213), elle nécessite l'emploi d'un nombre impair de sections sur l'induit, généralement on en prend 59, la figure pour plus de simplicité n'en porte que 11. Le fil d'entrée de la bobine 1 est réuni à la sortie de la section 2 et à la touche 2 du commutateur, l'entrée de 2 correspond avec la sortie

de 3 et avec la touche 3 et ainsi de suite. Il résulte de cette disposition que les forces électromotrices engendrées par chacune des paires de pôles s'ajoutent.

Fig. 213.

Les machines dynamo-électriques de 400 chevaux de la station centrale de la Markgrafen-Strasse, à Berlin, ont 10 pôles et 5 paires de balais accouplées en quantité.

235. **Excitation du champ magnétique.** — Dans les machines magnéto-électriques, le champ magnétique est constitué par des aimants permanents, ainsi que nous l'avons déjà dit, dès que l'on met l'induit en mouvement, il se trouve dans un champ ayant une intensité qui restera toujours la même.

Le champ magnétique des dynamos étant constitué par des électro-aimants, ceux-ci doivent être excités par un courant provenant d'une source extérieure, dans des cas exceptionnels, mais plus généralement de la dynamo elle-même. Les noyaux des électro-aimants quoique construits en fer doux conservent toujours une certaine aimantation, il en est de même des pièces polaires qui sont généralement faites en fonte, parce que ce métal conserve plus de magnétisme rémanent, et facilite l'amorcement des machines.

Au commencement du travail, l'induit d'une dynamo se meut donc dans le champ produit par le magnétisme rémanent des noyaux et des pièces polaires, il se produit un courant très faible à l'origine qui vient renforcer

le magnétisme des électros. L'intensité du courant et celle de l'aimantation vont donc en augmentant jusqu'à une certaine limite qui dépend de la vitesse de rotation de l'induit et de la dimension des aimants.

Lorsque l'on fait fonctionner une dynamo pour la première fois, il faut généralement commencer par communiquer l'aimantation aux pièces de fer en la faisant traverser par un courant provenant d'une source extérieure.

C'est cette propriété de pouvoir s'amorcer elles-mêmes qui a fait donner à ces machines le nom de *dynamo* introduit par Siemens, le fait avait été découvert il y a une vingtaine d'années par Varley et Wheatstone.

236. **Différents modes d'excitation.** — Les machines dynamo-électriques peuvent être classées en diverses catégories d'après la façon dont le courant d'excitation du champ magnétique est pris sur le circuit général.

On appelle machines *en série*, celles dans lesquelles tout le courant produit par la dynamo, traverse le fil des électro-aimants (fig. 214). Les bobines du champ magnétique seront donc formées d'un petit nombre de tours de gros fil.

Lorsque le circuit excitateur est formé par une déviation du courant principal (fig. 215), la machine est dite *excitée en dérivation ou en shunt*. Pour régler l'intensité du courant qui parcourt le champ magnétique, on intercale un rhéostat R, dont on peut faire varier à volonté la résistance.

On construit également des machines dans lesquelles l'aimantation est produite à la fois par le courant principal, qui parcourt un gros fil faisant un petit nombre de tours autour du fer doux du champ magnétique, et par une dérivation du courant principal formée par un

fil fin faisant un grand nombre de tours. Les deux cir-

Fig. 214.

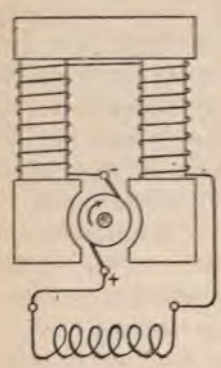
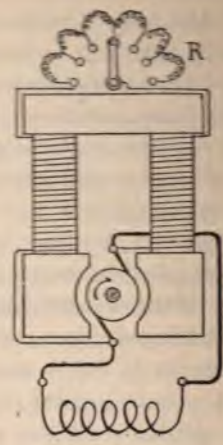


Fig. 215.



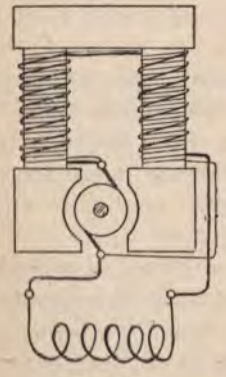


Fig. 216.

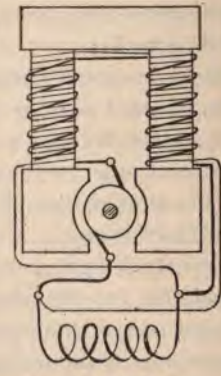


Fig. 217.

cuits sont enroulés dans le même sens de façon que leurs actions magnétiques s'ajoutent.

On les appelle *machines Compound* ou à *double enroulement*. Dans les dynamos de cette catégorie, la dérivation peut être prise directement aux balais (fig. 216) on les appelle machines à *court Shunt* (fig. 216) ou bien aux bornes de la machine, on les dit alors à *long Shunt* (fig. 217).

Enfin il existe une quatrième espèce de dynamos dans lesquelles le courant d'excitation provient d'une source extérieure, nous ne les citerons que pour mémoire, parce que on n'en fait usage que dans des cas particuliers. Les machines sont dites alors à *excitation séparée*.

Nous verrons tout à l'heure dans quels cas on emploie l'une ou l'autre des dispositions que nous venons d'indiquer.

237. **Calage des balais.** — Ainsi que nous l'avons vu, les points de contact des balais doivent se trouver sur la ligne qui correspond aux points où la force électromotrice induite dans les spires mobiles est nulle.

Si l'on n'avait à considérer que les lignes de force du

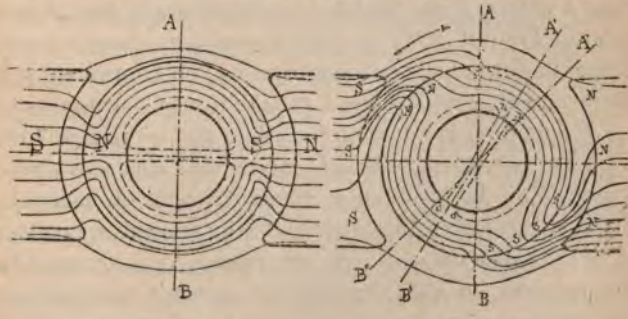


Fig. 218. Fig. 219.

champ magnétique inducteur (fig. 218) la ligne de contact des balais serait AB perpendiculaire à NS; mais en réalité les phénomènes qui se produisent sont beaucoup plus complexes par suite de l'aimantation du fer doux de l'induit par le courant qui circule dans celui-ci.

Les deux moitiés de l'anneau sont parcourues par des courants de sens contraire qui déterminent dans le fer doux de l'induit deux pôles conséquents qui réagissent sur ceux du champ magnétique inducteur et il en résulte une déformation des lignes de force (fig. 219) la ligne de force électromotrice nulle, se déplace de AB en A'B' dans le sens du mouvement, On doit donc déplacer de la même façon la ligne du contact des balais.

Mais il y a encore d'autres causes qui obligent à ce déplacement. Considérons une section de l'induit, avant d'arriver dans la direction A'B', elle est parcourue par un courant intense; comme le contact du balai ne se fait pas suivant une ligne mathématique mais sur une certaine largeur, la section considérée au moment où elle passe en A' par exemple, est mise en court circuit parce que le balai est en contact avec deux touches du collecteur à la fois. Il en résulte un extra-courant dans la section de l'induit (223, fig. 185), et par conséquent échauffement anormal. Cette même section, en continuant son mouvement, n'est le siège d'aucune force électromotrice, au moment où le court circuit cesse d'autre part le courant qui parcourt la seconde moitié de l'anneau s'y précipite, d'où la production d'une étincelle et usure du balai et des lames du collecteur. Si au contraire, on avait calé les balais un peu plus en avance dans le sens du mouvement, en A''B'' (fig. 219) au moment où la section est mise en court circuit elle serait le siège d'une force

électromotrice tendant à s'opposer à l'extra-courant dont nous avons parlé tout à l'heure, et lors de la rupture du court circuit, cette force électromotrice tendant à faire circuler un courant de même sens que celui qui s'y précipite, le renversement du sens du courant dans chaque section se fait sans production d'étincelle.

Nous voyons donc qu'il ne faut pas caler les balais suivant la ligne d'induction nulle, mais un peu au-delà, dans le sens du mouvement, on évite ainsi les effets nuisibles des extra-courants qui ont pour conséquence de produire des étincelles qui détruisent rapidement les balais et les collecteurs.

Lorsque l'on fait varier l'intensité du courant produit par une machine dynamo-électrique, le champ magnétique de l'induit change également, il en résulte un déplacement de la ligne A'B', il faut par conséquent que l'on déplace les balais de la même manière.

Le calage des balais pour lequel il se produit le moins d'étincelles, doit être déterminé par expérience, c'est pourquoi ceux-ci sont toujours disposés sur un support mobile autour de l'axe de l'induit.

238. **Caractéristique des machines dynamo-électriques.** — Lorsque le champ magnétique inducteur d'une dynamo est constant, la force électromotrice produite dans l'induit varie comme le nombre de lignes de force coupées dans l'unité de temps et par conséquent comme la vitesse de rotation ; seulement, lorsque le champ magnétique est variable, les relations qui existent entre l'intensité de ce champ, la vitesse de rotation de l'induit, la force électromotrice et l'intensité du courant ne sont pas simples, aussi a-t-on représenté par des tracés graphiques les principales propriétés des machines dynamo-

électriques. La méthode graphique a été employée pour la première fois par le docteur Hopkinson, M. Marcel Deprez a donné à ces courbes le nom de *caractéristiques* parce qu'elles montrent les caractères qui différencient les différents types de machines.

La fig. 220 représente, d'après le docteur Hopkinson, les caractéristiques d'une machine Siemens, excitée en série pour une vitesse de 720 révolutions par minute.

Dans une machine dynamo-électrique comme dans

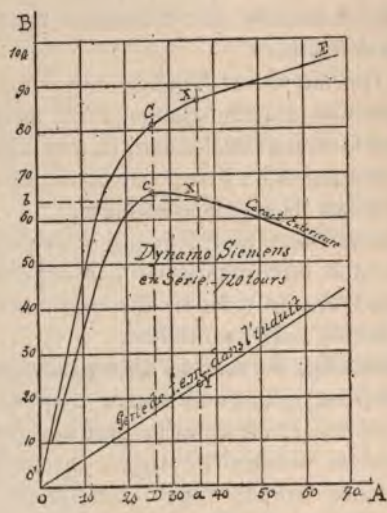


Fig. 220.

une pile à circuit fermé, nous devons faire une distinction entre la *force électromotrice totale et la force électromotrice aux bornes*. La force électromotrice totale est égale à la force électromotrice aux bornes de la

machine, augmentée de la perte de charge dans la machine elle-même, cette perte de charge est proportionnelle à l'intensité du courant qui parcourt la dynamo. Ainsi, dans le cas considéré, la résistance de la machine était de 0,6 d'ohm; pour un courant de 20 ampères, la force électromotrice aux bornes était de 60 volts, la perte dans la dynamo d'après la relation ($E = IR$) était de $20 \times 0,6 = 12$ volts, la force électromotrice totale engendrée était donc de $60 + 12 = 72$ volts.

Suivant l'horizontale OA, portons des longueurs telles que O*a*, proportionnelles à l'intensité du courant suivant OB prenons O*b* proportionnelle à la force électromotrice aux bornes; la courbe formée par les points de rencontre des lignes telles que *a*X et *b*X représentera la variation de la force électromotrice aux bornes de la dynamo pour diverses intensités du courant. La courbe ainsi obtenue est ce que l'on appelle la *caractéristique externe* de la dynamo.

La perte de force électromotrice due à la résistance intérieure de la machine sera représentée par les différentes intensités par la droite OY; pour l'intensité O*a*, la perte en volts *a*Y = *Intensité* × *résistance intérieure*.

Si à l'ordonnée *a*X, nous ajoutons XX' = *a*Y, *a*X' représente la force électromotrice totale, la courbe O' X' E s'appelle la *caractéristique interne*.

Il est à remarquer que cette courbe ne part pas de l'origine O, parce que pour une intensité de courant nulle dans les inducteurs, il y a déjà une force électromotrice due au magnétisme rémanent des pièces de fer; sans cette circonstance d'ailleurs la machine ne s'amorcerait pas.

Cette courbe nous montre que jusqu'à 60 volts environ

la force électromotrice varie à peu près proportionnellement à l'intensité du courant, arrivé à cette limite, le fer doux des électro aimants est arrivé au point de saturation magnétique, et la force électromotrice varie moins rapidement que l'intensité. Au-delà du point C, la tension aux bornes diminue, parce que l'augmentation d'intensité du champ magnétique ne compense plus la perte de volts dans la machine elle-même.

Nous voyons également que pour une vitesse de rotation constante, si l'on diminue la résistance extérieure de façon que l'intensité du courant augmente jusqu'à une valeur *o*D, la force électro motrice ira en augmentant.

Fig. 221.

La fig. 221 nous montre d'après les comptes rendus

des travaux du Comité international des essais électriques de l'Exposition d'Anvers, en 1885 les différentes caractéristiques d'une machine dynamo électrique Gramme, type d'atelier, excitée en dérivation.

239. Ce qui intéresse surtout au point de vue de l'emploi des machines, c'est leur *caractéristique extérieure* ou la façon dont la différence de potentiel aux bornes varie avec la résistance extérieure; d'après l'examen des fig. 220 et 221, nous pouvons voir que si nous faisons varier le courant produit par une machine *excitée en série, en faisant varier la résistance extérieure, sa force électro motrice augmente* lorsque la résistance extérieure diminue, et par conséquent quand son débit augmente, la vitesse de rotation restant uniforme.

Dans une *machine en dérivation*, au contraire, *la tension aux bornes diminue* en même temps que la résistance extérieure ou lorsque l'intensité extérieure augmente.

Lorsque la dynamo doit fournir une force électromotrice constante comme dans le cas de l'éclairage électrique toutes les lampes étant montées en dérivation, ou dans les applications à la galvanoplastie, on ramène la tension aux bornes à une valeur convenable au moyen d'une résistance variable R (fig. 215), intercalée dans le fil des bobines du champ magnétique.

Lorsque la résistance extérieure diminue, on réduit R de telle façon que le courant d'excitation augmente.

Comme pour une diminution de résistance extérieure, la force électromotrice d'une machine en série augmente, tandis que celle d'une dynamo en dérivation diminue, on a pensé qn'en excitant à la fois les dynamos en série et en dérivation, en disposant sur les électro-

aimants deux conducteurs enroulés dans le même sens (fig. 216 et 217), l'un de gros diamètre parcouru par tout le courant, l'autre plus fin, placé en dérivation, on pourrait, en employant des nombres convenables de tour du gros fil et du fin fil, arriver à compenser l'augmentation de tension provenant de l'excitation en série, par la diminution de celle provenant de la dérivation et obtenir ainsi une tension constante aux bornes de la machine.

240. Les dynamos dont les champs magnétiques sont ainsi composés, portent le nom de *compound* ou à *double enroulement*. On arrive à construire des machines dynamo électriques donnant une force électro motrice aux bornes presque constante pour des débits très variables.

La caractéristique extérieure de ces machines doit être une ligne droite parallèle à l'axe des intensités, à condition que la vitesse de rotation de la dynamo soit maintenue constante. La fig. 222 représente la caracté-

Fig. 222.

ristique extérieure de la machine Victoria, n° 720, pour des débits variant de 147 à 19 ampères, d'après les essais du Comité de l'Exposition d'Anvers. La tension aux bornes a varié de 62,8 v. à 66,2 v., soit de 34 v., la tension moyenne étant de 64,5 volts.

Nous devons toutefois faire observer qu'il est rarement utile ou même désirable qu'une machine dynamo élec-

trique donne une tension aux bornes tout à fait constantes.

Supposons une machine devant fournir un courant variant de 10 à 100 ampères, pour alimenter à une certaine distance un moteur des lampes ou tout autre consommateur d'énergie électrique demandant pour son fonctionnement normal une tension uniforme de 100 volts, si l'on admet une perte maximum de 5 pour 100 dans la ligne qui doit réunir la dynamo aux lampes moteurs, etc., la machine devra avoir une différence de potentiel aux bornes de 105 volts pour le régime de 100 ampères, et les conducteurs devront présenter une résistance extérieure de 0,05 d'ohm. Or, dans ces conditions, si l'on maintient constante la force électro motrice de 105 volts, lorsque le régime sera de 10 ampères, la perte dans la ligne sera de $10 \times 0,05 = 0,5$ volts, la tension au point où l'on utilise le courant sera devenue 104,5 v. ou lieu de 100 volts. Donc, à moins d'admettre dans les conducteurs une perte en volts négligeable, ce qui ne peut se faire qu'au prix d'une dépense considérable de premier établissement, il faudrait que la tension aux bornes de la machine augmente au fur et à mesure que le débit devient plus grand, c'est le contraire qui s'est présenté dans le cas de la fig. 222.

Il faudrait par conséquent étudier les machines Compound pour chaque cas particulier, de façon qu'elles donnent non pas une tension constante aux bornes, mais aux points où l'énergie électrique doit être utilisée. Aussi, d'une façon presque générale, on intercale un rhéostat dans le fil fin des bobines du champ magnétique des dynamos compound de façon à régler la force électromotrice d'après l'intensité du courant à fournir.

Il y a encore un autre point à considérer, nous avons vu que le champ magnétique de l'induit vient en déduction de celui produit par l'électro aimant, et qu'il résulte de là (237) un changement à apporter à la position du point de contact des balais sur le collecteur ; or le champ magnétique de l'induit varie avec l'intensité du courant qui le parcourt, il en résulte un déplacement de la ligne A' B' (fig. 219). Pour que la machine puisse être considérée comme autorégulatrice, il faut que les balais étant ajustés à la position où ils donnent le moins d'étincelles pour la charge totale de la machine, on n'ait pas besoin de faire varier le calage lorsque le débit est diminué jusqu'à sa limite inférieure. Si l'on doit changer l'angle de calage pour supprimer les étincelles, la machine ne peut être considérée comme autorégulatrice, puisque le réglage des balais demandera la présence d'un homme. En fait, c'est ce qui se présentera souvent lorsque le débit doit être très variable.

La conduite d'une machine dynamo-électrique de quelqu'importance demande toujours la présence d'un homme; une machine Compound, dans une installation importante, demandera la présence d'un agent pour son réglage et son entretien, tout comme une machine en dérivation. Si le courant à fournir est sensiblement constant, on peut régler une fois pour toutes la résistance intercalée dans le champ magnétique de la machine en dérivation ; il ne faut donc pas attendre un réglage complètement automatique des machines Compound, et dans la plupart des cas les machines en dérivation peuvent rendre les mêmes services. Lorsque l'on a besoin de régimes très variables, comme dans le cas de déchargement d'accumulateurs, ces dernières s'imposent ainsi que nous le verrons.

241. Considérations générales sur les machines dynamo-électriques. — A quel genre d'induit doit-on donner la préférence? Anneau Gramme, tambour Siemens ou anneau plat genre Schuckert.

Au point de vue théorique, nous savons (216) que la force électromotrice engendrée dans l'induit dépend de la variation du nombre de lignes de force ou du flux de force à travers chacune des spires du fil de l'induit. Dans le cas de l'anneau Gramme ou Schuckert, les spires ont la forme *abcde* (fig. 223) et tournent autour de l'axe X X′ qui se trouve dans leur plan. Pour l'induit en tambour, les spires ont la forme rectangulaire (fig. 224) et tournent,

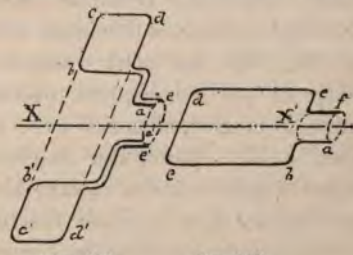


Fig. 223. Fig. 224.

soit autour d'un axe X X′ situé dans leur plan, ou parallèlement à celui-ci (fig. 224). La résistance des conducteurs *abcde* constitue une perte pour le rendement, la forme à préférer sera donc celle pour laquelle la longueur de fil *abcdef* sera la plus petite possible pour le plus grand nombre de lignes de force interceptées, et par conséquent dans un champ magnétique d'intensité donnée, il faut choisir la figure dans laquelle le périmètre est le plus petit pour une surface déterminée. Cette figure est la circonférence. Théoriquement, l'induit

qui présenterait le moins de résistance pour une force électromotrice déterminée serait un induit dont toutes les spires seraient circulaires et par conséquent qui aurait la forme d'une *sphère*. C'est celle qui a été adoptée par Thomson-Houston dans sa dynamo en série.

Au point de vue de la construction et de l'entretien, les induits en tambour sont plus faciles à confectionner que les anneaux Gramme, mais en cas d'accident à ces derniers on peut se borner à dérouler le fil des sections endommagées, tandis que l'on est généralement obligé de défaire complètement les induits Siemens, parce que les fils des différentes sections se croisent aux extrémités.

En donnant à l'anneau Gramme la forme plate, comme celle adoptée dans les machines Victoria (Schuckert-Mordey) (fig. 205), on peut donner à l'induit un grand diamètre et par conséquent obtenir une même vitesse linéaire à la circonférence avec une vitesse de rotation plus faible. Dans ces machines il arrive presque toujours que l'un des électro-aimant est plus puissant que l'autre, soit à cause des différences de diamètre du conducteur employé, soit par suite des différences de conductibilité. Il en résulte que l'induit est sollicité à se déplacer d'un même côté, et il faut prendre des précautions pour qu'il ne vienne pas à se produire de frottement entre l'induit et les inducteurs, ce qui amènerait la destruction de l'anneau.

Au point de vue de la bonne marche il est indispensable que le centre de gravité de l'induit tombe sur l'axe de rotation, lorsque cette circonstance n'est pas réalisée, l'axe de rotation subit une flexion par suite de l'action de la force centrifuge, ce qui donne lieu à des vibrations et à des trépidations qui non seulement entraînent une

usure rapide, mais donnent lieu à une dépense inutile d'énergie mécanique.

242. — La force électromotrice engendrée dans l'anneau est directement proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, il en résulte que pour diminuer la résistance de l'induit, il faut que le champ magnétique soit le plus puissant possible sous un petit volume.

Or nous savons que le fer doux est la matière qui a la propriété de concentrer le plus les lignes de force, c'est-à-dire qui arrive à posséder l'aimantation la plus grande pour la plus petite section transversale, il en résulte que l'on devra employer pour former les noyaux des électro-aimants et l'âme de l'induit le fer aussi doux qu'il sera possible. L'emploi de fer bien doux a encore une autre conséquence, nous savons que la force magnétisante d'un électro-aimant dépend directement du produit de l'intensité du courant qui parcourt les bobines du champ magnétique, par le nombre de tours de fil sur ces bobines. Ce produit s'appelle le nombre d'*Ampères-tours*. Lorsqu'on emploie du fer très pur, la section des noyaux des bobines est réduite à un minimum, et par conséquent la longueur du fil conducteur, la résistance électrique du champ magnétique et la dépense d'énergie nécessaire pour l'excitation est plus faible que si l'on emploie des noyaux en fonte ou en fer impur.

Il arrive que dans les machines dynamo-électriques, surtout celles qui sont excitées en série, la polarité des électro-aimants change, et cela quelquefois sans cause bien déterminée. On évite cet inconvénient en employant des pièces polaires en fonte, ce métal s'aimantant d'une façon permanente, la polarité des machines est plus stable que si l'on faisait usage d'électros complètement

en fer doux, qui présenteraient en outre l'inconvénient de ne pas conserver assez d'aimantation pour que l'amorcement de la machine se produise.

Le diamètre du fil conducteur à enrouler sur les électro-aimants dépend du mode d'exitation; dans les machines en série, tout le courant parcourant le champ magnétique, on emploiera sur les électros un petit nombre de tours de gros fil; tandis que dans les machines en dérivation, où la résistance du champ magnétique doit être beaucoup plus grande que celles de l'induit et du circuit extérieur, on doit employer du fil fin, auquel on fait faire un grand nombre de tours pour arriver à obtenir un nombre d'Ampères-tours suffisant.

Dans les machines Compound, on emploie un petit nombre de spires de gros fil parcourues par le courant total de la machine et un grand nombre de tours de fil fin parcourus par la courant dérivé. Dans la machine Victoria, dont nous avons donné la caractéristique extérieure (fig. 222), la résistance de l'induit était de 0,02225 ohm. Celle des inducteurs en série de 0,01605 ohm pour le fil en série et de 4,55 ohms pour la dérivation (1).

La résistance de l'air au passage des lignes de force magnétique étant beaucoup plus grande que celle du fer doux, ou des autres métaux magnétiques, il faut faire en sorte que le circuit magnétique soit aussi continu que possible. Les différentes pièces des électro-aimants devront être assemblées de façon qu'il y ait contact

(1) On peut arriver à calculer assez approximativement tous les éléments d'une machine dynamo-électrique, seulement l'exposé de cette étude sortirait beaucoup du cadre que nous nous sommes tracé dans ce traité.

intime sur la plus grande surface possible et cela sans interposition d'aucune matière.

La distance entre l'induit et les inducteurs devra être réduite au minimum. Cependant il faut veiller à ce que par suite de l'usure des coussinets ou de l'axe de rotation il ne vienne à se produire un contact entre l'induit et les pièces polaires de l'inducteur.

243. **Rendement des machines dynamo-électriques.** — Un certaine quantité d'énergie mécanique que nous appellerons A étant fournie à une machine dynamo-électrique, on ne retrouve qu'une certaine fraction de cette énergie, sous forme d'énergie électrique *utilisable*, aux bornes de la machine; ce travail A pendant l'unité de temps peut se décomposer comme suit :

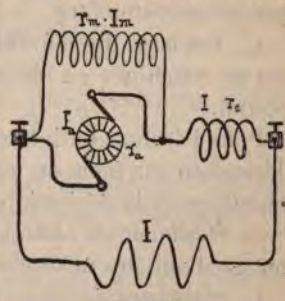


Fig. 225.

1° Travail des frottements de la dynamo marchant à vide.

2° Travail perdu par l'échauffement des masses métalliques par suite des courants de Foucault qui s'y développent. Cette partie est très faible à cause des précautions prises dans la construction; généralement on la néglige.

3° Travail absorbé pour faire circuler le courant à travers l'induit et qui se transforme en chaleur.

4° Travail absorbé par suite de la résistance des électro-aimants.

5° Energie disponible utilisable aux bornes de la machine.

Appelons : A le travail mécanique fourni par le moteur à la dynamo pendant l'unité de temps, ce travail peut se mesurer au moyen d'un dynamomètre de transmission, ou en évaluant le travail indiqué fourni par le moteur, lorsqu'il s'agit de grandes dynamos actionnées par des moteurs spéciaux.

e, la différence de potentiel aux bornes de la machine, cet élément s'évalue au moyen du voltmètre.

I, intensité du courant dans le circuit extérieur, donné par un ampèremètre.

I_m, intensité du courant dans les inducteurs, dans le cas de machines en dérivation ou de machines compound.

Pour l'évaluer on intercale un ampèremètre dans la dérivation ou bien on peut la calculer connaissant la résistance de la dérivation.

r_a, résistance en ohm de l'induit que l'on peut mesurer par l'une des méthodes que nous avons indiquées.

r_e, résistance en ohms des inducteurs en série. Que l'on peut également mesurer directement.

Connaissant ces éléments on peut calculer le rendement d'une dynamo.

$I_a = I + I_m$, dans les dynamos en série $I_m = 0$ et $I_a = I$.

La puissance électrique utilisable dans le circuit extérieur est $T = e\,I$ watts $= \frac{eI}{736}$ chevaux-vapeur.

L'équivalent en chevaux de l'énergie transformée par 1″ en chaleur dans la dynamo est de :

$T_a = \frac{I^2_a r_a}{736}$ chevaux-vapeur *pour l'induit*.

$T_c = \frac{I^{2a} r_c}{736}$ chevaux-vapeur *pour les spires en série de l'inducteur.*

$T_m = \frac{I_m e}{736}$ — *pour les spires en dérivation de l'inducteur.*

La partie de A transformée en énergie électrique dans la dynamo est :

$T = \tau + T_a + T_c + T_m$ = énergie électrique totale.

$\frac{T}{A}$ = rendement total de la dynamo.

$\frac{\tau}{T}$ = rendement électrique et $\frac{\tau}{A}$ = rendement industriel.

Voici les résultats obtenus sur la machine Victoria, n° 720, par la Commission des essais électriques de l'Exposition d'Anvers, en 1885.

Dynamo à court shunt à 4 pôles inducteurs et 2 balais.

$r_a = 0{,}02225$

$r_c = 0{,}01605$ $r_m = 4{,}55$ ohms.

Vitesse de la machine. V	Travail absorbé en chevaux. A	Différence de potentiel aux bornes. e	Int. en Amp. Dans le fil extérieur. I	Int. en Amp. Dans la dérivation. Im	Travail utile. Circuit extérieur. τ	Travail électr.-intérieur. Dans l'induit $T_a = \frac{I^2_a r_a}{736}$	Travail électr.-intérieur. Dans les inducteurs. Dérivation : $T_m = \frac{I^2 r_m}{736}$	Travail électr.-intérieur. Dans les inducteurs. $T_e = \frac{I^2 r_e}{736}$	$T = \tau + T_a + T_e + T_m$	Rendement total. $\frac{T}{A}$	Rendement électr. $\frac{\tau}{T}$	Rendement industr. $\frac{\tau}{A}$	Résistance extérieure calculée.
775	16.10	62.8	147.0	14.65	12.54	0.790	1.328	0.471	15.129	0.94	0.829	0.779	0.427
775	17.402	63.4	130.3	14.5	11.23	0.634	1.300	0.37	13.534	0.778	0.830	0.646	0.486
775	15.80	63.9	113.0	14.5	9.81	0.481	1.300	0.278	11.869	0.752	0.826	0.621	0.566
788	13.72	65.6	78.3	14.5	6.98	0.260	1.300	0.133	8.673	0.632	0.805	0.509	0.838
788	10.83	66.0	57.6	14.5	5.165	0.157	1.300	0.0722	6.694	0.618	0.772	0.477	1.145
778	7.46	66.2	19.1	14.5	1.717	0.034	1.300	0.0078	3.059	0.41	0.562	0.23	3.46
780	6.36	66.6	0	14.5	0	0.006	1.300	0	1.306	0.2055	0	0	∞

La machine marchant à pleine charge, 147 ampères et 62,8 v., le rendement industriel atteint 80 p. 100 et le rendement total 94 p. 100. Le champ magnétique absorbe 1.328 + 0.471 = 1.799 ch., soit 1,12 p. 100 de travail fourni à la dynamo.

Ces résultats montrent que les machines dynamo-électriques ne sont plus guère perfectibles qu'au point de vue des détails de construction.

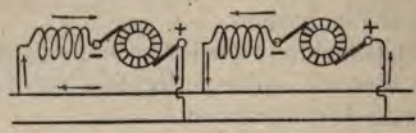
244. **Réunion de plusieurs machines à courant continu.** — Dans certains cas, lorsque, par exemple, l'énergie électrique à fournir varie dans de larges limites à des moments déterminés, il peut être avantageux de ne pas employer une machine dynamo capable de fournir l'énergie maximum dont on peut avoir besoin, mais d'associer plusieurs machines au fur et à mesure que l'énergie à fournir augmente.

a) *Machines excitées en série.* Les machines excitées en série peuvent *s'accoupler en tension*, comme on le fait pour les éléments de pile, à condition que chacune des machines puisse résister au courant maximum qui doit les traverser toutes. Les dynamos peuvent être dissemblables, leurs forces électromotrices s'ajoutent.

Mais il est absolument impossible de réunir deux dynamos semblables en *dérivation* : soient les deux dynamos A et B disposées pour envoyer en arc parallèle leur courant dans les conducteurs CD et EF (fig. 226). Au moment de la mise en marche, l'un des dynamos conserve toujours plus de magnétisme rémanent que l'autre, elle s'amorce la première, et envoie son courant au travers de l'autre, mais dans le sens inverse de celui que cette dernière devrait fournir, la polarité des électro-aimants sera renversée, et les deux machines A et B fonctionneront

comme si elles étaient réunies en tension sans résistance intermédiaire. Si la force motrice dont on dispose était

Fig. 226.



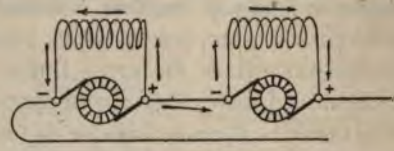


Fig. 227.

suffisante, l'intensité du courant deviendrait telle que les machines seraient détruites à l'instant.

b) *Machines excitées en dérivation.* — Pour ces dynamos la situation se présente d'une façon tout à fait inverse. Supposons que l'on veuille accoupler les deux machines A et B en tension, l'une des deux s'amorcera avant l'autre, par exemple, A (fig. 227), le champ magnétique sera parcouru par un courant dont le sens est indiqué par les flèches; A enverra son courant dans B, mais la dérivation de celle-ci sera parcourue par un courant de sens contraire à celui qui parcourt le champ magnétique de A, la polarité de B sera renversée, et elle produira une force électro motrice de sens contraire à celle de A. Par conséquent, un pareil système étant mis en marche, l'une des machines s'amorce, puis le courant va en diminuant et au bout de quelques instants il devient nul.

Il y a un artifice qui permet de tourner la difficulté, il

faut réunir en tension les bobines des deux champs magnétiques des machines A et B comme l'indique la fig. 228. La force électromotrice produite est égale à la somme des tensions engendrées par chacune des dynamos.

L'accouplement en quantité (fig. 229) ne présente

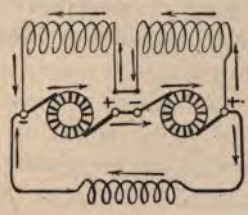


Fig. 228.

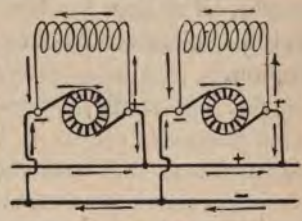


Fig. 229.

aucune difficulté, le courant se partage entre les machines en raison des résistances des différents circuits et par conséquent en raison de la puissance des dynamos.

Il en résulte que lorsqu'on accouple en parallèle plusieurs machines excitées en dérivation même dissemblables, le partage se fait entre elles au bout de quelques instants, surtout si les machines sont commandées par des moteurs séparés.

Ainsi si la force électromotrice de B venait à diminuer, le travail emprunté au moteur devenant plus petit, sa vitesse tendrait à augmenter et l'équilibre serait rapidement rétabli.

c) *Machines Compound.* — Les propriétés de ces dynamos participant à la fois de celles des machines excitées en série et en dérivation, il en résulte que l'on ne peut les accoupler ni en série ni en parallèle, de façon à conserver à chacune d'elles sa marche indépendante.

Dans une installation où l'intensité du courant à fournir varie dans des limites très étendues, comme par exemple dans une station centrale d'éclairage électrique où l'on doit mettre en marche des dynamos au fur et à mesure que la consommation de courant augmente, comme ces machines doivent alimenter toutes les mêmes conduites, on ne peut pas faire usage de machines Compound, on doit avoir recours aux machines excitées en dérivation.

CHAPITRE XIX

MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

245. — Pour les applications du courant à l'éclairage électrique, il n'est pas toujours nécessaire que le courant fourni par les machines dynamo-électriques soit continu et de même sens, ainsi le circuit extérieur peut être parcouru par des courants alternatifs de sorte que l'on peut se passer de l'artifice que nous avons indiqué (230, 231) pour arriver à produire dans le circuit extérieur de la machine un courant direct.

Les divers systèmes de machines à courants alternatifs se rapportent à deux types principaux; la *machine Gramme* et la *machine Siemens*.

246. **Machine Gramme à courants alternatifs.** — Comme dans les dynamos à courant continu, nous avons un inducteur et un induit.

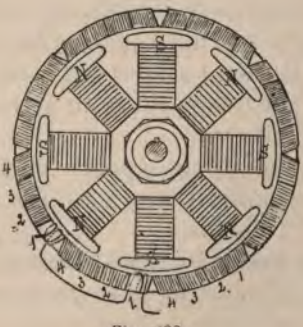


Fig. 230.

L'inducteur (fig. 230) a la forme d'une étoile en fer doux ayant un nombre pair de branches, sur chacune desquelles est placée une bobine de conducteur isolé de façon à constituer un électro-aimant. Le noyau en fer doux est terminé vers l'extérieur par un épanouissement polaire. Les pôles sont alternativement N et S. Toutes les bobines de l'inducteur sont accouplées en tension et sont excitées par un courant *continu* provenant d'une source extérieure, généralement une dynamo à courant direct.

L'induit, placé à l'extérieur, est fixe ; il est constitué par un anneau à âme en fer doux autour de laquelle les sections de fil sont enroulées comme dans l'anneau Gramme pour machine à courant continu. Cet anneau comprend 8 sections principales dont les fils sont enroulés alternativement en sens inverse, chacune d'elle est subdivisée en un certain nombre de parties variant de 4 à 12. Dans la figure nous avons représenté 4 sections, 1, 2, 3, 4. Il est facile de voir que toutes les sections de même numéro sont en même temps traversées par un flux magnétique identique, qui changera de sens par suite du déplacement des pôles de l'inducteur. Ces sections seront donc parcourues par des courants alternatifs. Si nous réunissons en tension les 8 sections 1, les forces électromotrices qui s'y développent étant à chaque instant de même sens s'ajouteront.

La machine ainsi disposée pourra alimenter 4 circuits différents. On construit des machines de ce système ayant jusqu'à 12 circuits.

247. **Machine Siemens à courants alternatits.** — Dans celle-ci l'induit est fixe, l'inducteur au contraire est mobile.

L'inducteur est formé de deux couronnes en fonte A

et B (fig. 231) portant une série d'électro-aimants dont les pôles de noms contraires sont placés en regard l'un de l'autre de façon à créer une série de champs magnéti-

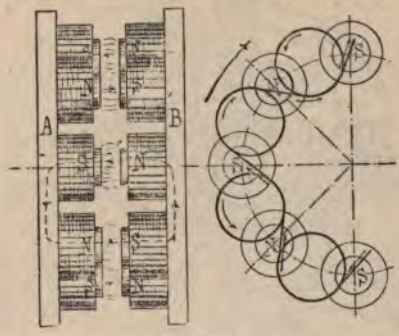


Fig. 231.

ques intenses dont les lignes de force sont alternativement dirigées en sens contraire. Le système induit est formé par une série de bobines montées sur une couronne mobile en bronze. Ces bobines sont en nombre égal à celui des pôles de l'une des faces de l'inducteur ; elles sont enroulées alternativement en sens inverse, de façon que les forces électro-motrices qui s'y produisent s'ajoutent.

Les bobines remplissent aussi exactement que possible l'espace laissé entre les pôles des électro-aimants, de façon que l'emploi du fer à l'intérieur de la bobine n'est pas nécessaire.

Comme pour la machine Gramme, on emploie une excitatrice à courant continu pour produire le champ magnétique inducteur.

Les machines à courants alternatifs les plus répandues actuellement sont celles de *Zipernowski*, de *Westinghouse* et de *Ferranti*.

248. **Machine Zipernowsky.** — (fig. 232 et 233). L'inducteur a la même forme que celui de la machine Gramme, l'in-

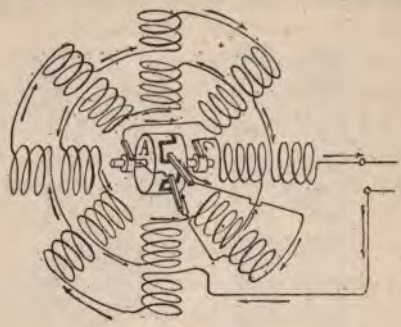


Fig. 232.

duit est formé par une série de bobines enroulées de façon que le plan des spires soit perpendiculaire aux rayons de l'inducteur. Les bobines de l'inducteur et de l'induit ont des noyaux en fer doux formés de tôles minces isolées électriquement l'une de l'autre, afin d'éviter les courants de Foucault qui se produiraient par suite de la variation du flux magnétique traversant le fer.

Ces machines présentent une particularité ; elles sont auto-excitatrices, c'est-à-dire qu'une partie du courant qu'elles produisent est utilisée pour l'aimantation du champ magnétique. La figure 232 représente une machine à 8 pôles inducteurs et 8 sections dans l'induit, l'une des sections envoie son courant dans les électro-aimants ; mais comme ce courant est alternatif il doit préalablement être redressé par un commutateur A monté sur l'axe de l'inducteur.

249. **Machine Westinghouse.** — L'inducteur est extérieur

et fixe. Les pôles font saillie à l'intérieur d'un cylindre en fonte (fig. 234). L'induit a la forme d'un tambour sur

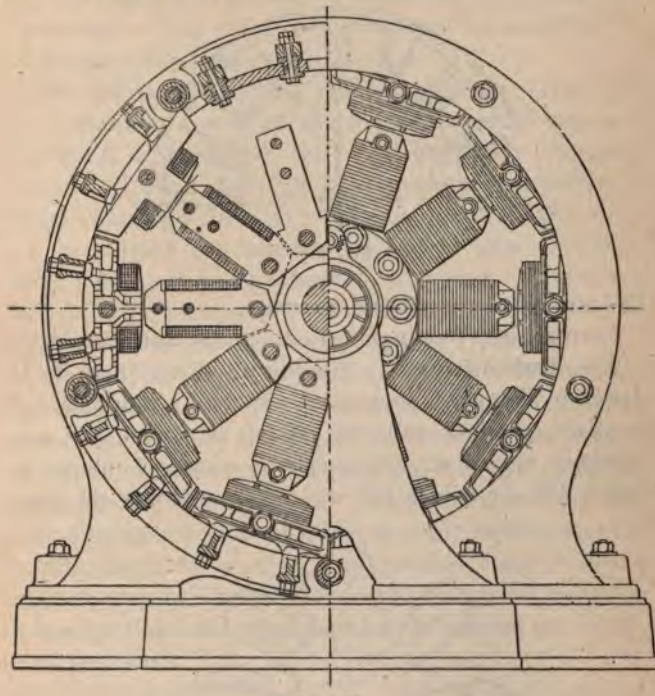


Fig. 333.

lequel sont disposées les bobines induites en nombre égal à celui des pôles; les fils étant placés suivant les génératrices du cylindre.

Dans les machines Zipernowsky, on peut enlever une section de l'induit sans démonter la machine, tandis que dans celle de Westinghouse, il faut enlever le tambour

tout entier. Avec les premières il suffit d'avoir une ou deux sections de rechange tandis qu'avec les secondes il

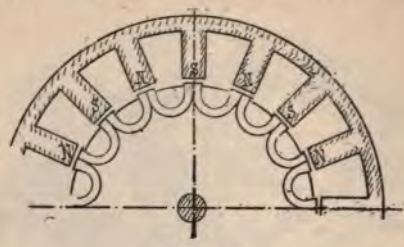


Fig. 234.

faut un induit complet de réserve.

Les machines Westinghouse ont une excitatrice séparée.

250. **Machine Ferranti.** — Elle dérive directement de la dynamo Siemens à courants alternatifs. L'inducteur est le même que dans celle-ci; l'induit est formé par une bande de cuivre continu disposée comme l'indique la figure 235. Ce ruban fait un certain nombre de tours

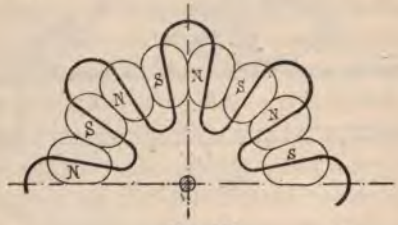


Fig. 235.

complets suivant la force électromotrice que l'on veut obtenir. Chacune des extrémités de la bande de cuivre aboutit à un anneau isolé fixé sur l'axe, et le courant s'écoule par des balais reposant sur ces anneaux.

Comme dans la machine Siemens, l'induit ne contient pas de fer et son épaisseur est très faible, de façon à réduire autant que possible la résistance magnétique de l'inducteur et par conséquent à arriver à consommer le minimum d'énergie pour l'excitation.

251. **Couplage des machines à courants alternatifs.** — On peut faire travailler plusieurs machines dynamo à courants alternatifs en parallèle, de façon que leurs courants s'ajoutent; il faut pour cela qu'elles soient construites de façon à donner exactement le même nombre d'alternances de courant par seconde; en outre cette condition étant remplie, il faut que les deux machines soient mises au pas, c'est-à-dire que la même période de la phase se produise en même temps pour chaque dynamo,

Ainsi si l'on réunissait les deux machines au moment où l'une d'elles produit un courant dans un sens et l'autre le courant inverse, il est clair que le courant résultant serait la différence des courants produits par chacune des dynamos; si au contraire on accouple les deux machines au moment où leurs forces électromotrices ont la même valeur, le nombre d'alternances étant le même pour chacune d'elles, les courants s'ajouteront à chaque instant et l'intensité résultante sera la somme des intensités partielles.

CHAPITRE XX

UTILISATION DU COURANT ÉLECTRIQUE

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

252. — Nous savons que le courant électrique, suivant les conditions dans lesquelles on se place, peut produire des actions calorifiques, chimiques ou mécaniques. En faisant usage de dispositifs convenablement agencés, on peut utiliser ces actions pour diverses applications industrielles ; savoir : les actions calorifiques pour porter à l'incandescence des corps réfractaires et utiliser ceux-ci comme source de lumière, ou bien pour fondre des métaux; les actions chimiques pour l'extraction des métaux par la décomposition des sels métalliques, ce qui constitue l'électro-métallurgie et la galvanoplastie, ou bien on peut emmagasiner l'énergie chimique comme dans les accumulateurs; les attractions et les répulsions produites par les électro-aimants sont utilisées pour faire marcher les moteurs électriques pour la télégraphie, pour la production des sons, comme dans le téléphone. Nous allons passer rapidement en revue ces diverses applications industrielles.

253. **Lampes à incandescence.** — Considérons un conducteur composé de parties présentant des résistances diverses, par exemple, un fil AB (fig. 236) présentant un amincissement CD. Supposons que la résistance de AC + CD soit égale à 1 ohm, et que celle de CD soit de 100 ohms. Si nous faisons passer un courant électrique d'in-

tensité I de A en B, l'énergie électrique se transformera en chaleur; la loi de Joule (82) nous fait connaître la

Fig. 236.

quantité de chaleur développée dans chacune des parties du conducteur pendant l'unité de temps; elle est égale à ($I^2R \times$ équivalent mécanique de la chaleur) calories. Si nous connaissons le calorique spécifique de la matière dont le conducteur est formé, nous pourrons calculer la température à laquelle il sera porté.

Dans le cas de la figure 236, la quantité d'énergie transformée en chaleur dans la partie CD sera 100 fois plus grande que dans AB + CD; si l'intensité du courant est de 1 Ampère, une quantité de chaleur équivalent à 100 Watts sera produite dans CD pendant chaque unité de temps ou $100 \times 0{,}24 = 24$ calories Gramme par seconde (1 Watt équivalent à 0,24 de calorie Gramme degré par seconde).

Après un certain temps, le régime du courant étant établi, la quantité d'énergie électrique transformée en chaleur pendant chaque unité de temps, sera égale à la quantité perdue par rayonnement pendant la même période. Si le conducteur présente une grande surface, la plus grande partie de la chaleur produite se perdra par rayonnement, et son échauffement pourra n'être pas sensible; c'est ce qui se passe dans les conducteurs employés pour transmettre le courant électrique. Mais si le corps a une grande résistance sous un faible volume, la quantité de chaleur perdue par rayonnement sera relativement bien moins grande et sa température s'élèvera,

il sera porté au rouge, puis il deviendra incandescent et, enfin, si le courant est suffisamment intense, il pourra être fondu et même volatilisé.

Chaque fois que dans un circuit électrique, parcouru par un courant suffisant, on produit en un point donné une grande résistance sous un faible volume, il se produit en ce point une grande quantité de chaleur.

254. — C'est sur le principe que nous venons d'énoncer que sont basés les systèmes d'éclairage par incandescence, *qui consistent à porter, au moyen du courant, un conducteur de petit volume à une température suffisamment élevée pour qu'il devienne lumineux.*

La matière dont ce conducteur est formé doit donc être incombustible, réfractaire et avoir une résistance spécifique assez élevée.

A l'origine, on a essayé de faire usage d'un fil de platine enroulé en hélice, mais ce métal quoique peu oxydable et ayant un point de fusion élevé, se désagrégeait trop rapidement pour permettre de l'employer d'une façon économique; aussi il est complètement abandonné et on l'a remplacé par le charbon. Cette dernière matière répond en effet à la plupart des conditions requises, elle est moyennement conductrice, infusible à toutes les températures. Malheureusement elle est combustible, de sorte que l'on ne peut la porter à l'incandescence dans l'air, sinon elle brûlerait immédiatement; il faut donc enfermer le charbon dans un espace absolument privé d'air.

Le conducteur en charbon devant avoir une grande résistance sous un faible volume, devient un filament très ténu et très fragile. La difficulté a été d'arriver à fabriquer un charbon suffisamment compact pour ne pas

se désagréger même en étant porté à l'incandescence d'une façon continue.

Les différents inventeurs ont employé dans ce but des fibres végétales préparées de diverses façons; ainsi le filament de la lampe Swann est constitué par un fil de coton parcheminé au moyen de l'acide sulfurique, traitement qui donne une grande compacité à la fibre végétale, celle-ci est ensuite carbonisée en vase clos; Édison emploie une fibre de bambou carbonisée en vase clos; Lane-Fox, Crooks, etc., emploient également des filaments d'origine végétale, préparés de diverses façons et finalement carbonisés à l'abri de l'air, on arrive ainsi à obtenir un charbon compact et solide.

Le filament conducteur étant obtenu, on l'attache par ses extrémités à deux fils de platine *ab*, *cd* qui serviront à amener le courant; ces conducteurs passent à l'intérieur d'un tube en verre A fermé en B (fig. 237). On a choisi le platine parce que ce métal a un cœfficient de dilatation à peu près égal à celui du verre dans lequel les fils sont scellés; si l'on employait un métal plus dilatable, le cuivre, par exemple, il se produirait des rentrées d'air entre le conducteur et le verre. Aux points *a* et *c* où se fait la liaison avec le filament de charbon, il doit y avoir des renflements pour que cette partie soit rendue plus conductrice que le charbon, afin de limiter la longueur de la partie incandescente.

Fig. 237.

Dans les lampes Edison, la soudure se fait au moyen d'un dépôt galvanique de cuivre; d'autres constructeurs établissent la jonction au moyen d'un mastic à base de

charbon finement divisé. Cette opération terminée, on introduit le tout dans l'ampoule C et l'on soude A et C en D. L'ampoule est terminée à la partie supérieure par un tube E que l'on met en communication avec une machine à faire le vide, lequel doit être poussé aussi loin que les moyens les plus perfectionnés le permettent; la plus petite quantité d'air restant enfermée serait suffisante pour brûler le filament en charbon.

On emploie pour cette opération les pompes à mercure de Geissler, ou la trompe de Sprengel (1). Avec ces appareils, on arrive à réduire la pression à l'intérieur de la lampe à $\frac{1}{388}$ de millionième d'atmosphère soit 0,000,006 de millimètre de mercure.

Pendant tout le temps que l'on fait le vide, on fait passer un courant électrique à travers le filament de la lampe, on augmente progressivement l'intensité, de façon à porter le filament à l'incandescence vers la fin de l'opération. Cette précaution est indispensable pour permettre aux gaz condensés dans les pores du charbon de se dégager.

Quand le vide est poussé assez loin, on ferme le tube E au moyen du chalumeau. Il ne reste plus qu'à munir la lampe d'une monture destinée à l'attacher facilement sur le support par où le courant lui est amené.

255. **Résistance du filament.** — On a tout avantage à faire le filament aussi mince que possible, de façon à réduire sa longueur et par conséquent son volume pour une résistance électrique déterminée; la quantité d'énergie à

(1) Pour la description de ces appareils voir : *The Developpement of the Mercurial air Pump*, par le professeur Silvanus, P. Thompson, *Conférence à la Société des arts de Londres*, 23 novembre 1887.

dépenser pour porter le charbon à l'incandescence sera d'autant plus petite que son volume sera plus réduit. On est limité sous ce rapport par les conditions de fabrication, il y a une épaisseur de filament en dessous de laquelle il n'est pas possible de descendre.

Les filaments trop minces sont extrêmement fragiles, pour les lampes qui doivent être placées à des endroits où elles sont soumises à des vibrations, comme près des machines ou dans les bateaux à vapeur ; il faut prendre de préférence celles dont le filament est bouclé, qui sont moins sensibles aux trépidations que celles en simple fer à cheval.

La résistance électrique dépend de la puissance lumineuse que l'on veut obtenir, de l'intensité du courant qui les alimente et de la différence de potentiel aux extrémités du filament.

Pour une même puissance lumineuse, on peut employer un faible courant avec une grande force électromotrice, ou bien un fort courant avec moins de tension, de façon que l'énergie dépensée dans la lampe soit toujours la même. Ainsi, si une lampe de 20 bougies exige un courant de 0,7 d'ampère avec une tension de 100 volts soit 70 watts de puissance, avec une tension de 50 volts il faudra un courant de 1,4 ampère.

Dans le premier cas la résistance de la lampe à chaud sera de $\frac{100}{0,7} = 143$ ohms et dans le second de $\frac{50}{1,4} = 35,7$ ohms Le filament pour la lampe à haute tension devra donc être ou beaucoup plus long ou beaucoup plus mince. Sous ce rapport encore on est limité par une question de fabrication et au-delà d'une tension de

150 volts, les charbons deviennent trop fragiles pour donner de bons résultats pratiques.

Les mêmes raisons limitent la puissance lumineuse des lampes, on en construit pour des puissances variant de 1 à plusieurs centaines de bougies, mais couramment on ne dépasse guère 20 bougies.

La résistance électrique des lampes à incandescence à filament de charbon est plus petite à chaud qu'à froid; ainsi, une lampe Lane-Fox, de 20 bougies, présentant à froid une résistance de 122 ohms n'a plus que 59 ohms de résistanse lorsqu'elle est portée à la température qui correspond à son intensité lumineuse normale (1).

Pour les lampes Cruto, au contraire, dont le filament est formé par un fil de platine extrêmement mince sur lequel on dépose du charbon par voie électrolytique, la présence du métal a pour conséquence de faire augmenter la résistance électrique; pour une lampe ayant 70 ohms à froid, celle-ci passe à 91 ohms à l'incandescence.

256. **Durée des lampes.— Rendement lumineux.** — Pour une lampe déterminée, la durée, l'intensité lumineuse fournie et la puissance mécanique dépensée sont intimement liées.

La *durée* dépend de la température à la laquelle le filament est porté et par conséquent de l'intensité du courant qui la traverse. L'incandescence prolongée a pour effet de volalitiser partiellement le charbon et de le désagréger, il est facile de comprendre que la destruction sera d'autant plus rapide que la température du filament et par conséquent le rendement lumineux d'une même

(1) *Comptes rendus des travaux du Comité international chargé des essais électriques à l'Exposition d'Anvers*, 1885.

lampe seront plus élevés. Pour chaque espèce de lampe, il y a une limite de courant que l'on ne doit pas dépasser. On arrive ainsi à une durée qui peut varier de 1,000 à 1,200 heures. Si au bout de ce temps le charbon n'est pas brisé, il arrive généralement que l'ampoule est tapissée intérieurement d'une couche de carbone volatilisé qui intercepte une partie de la lumière, de sorte que l'on a intérêt à mettre la lampe au rebut.

257. *Rapport entre le rendement lumineux et la puissance mécanique dépensée.* — Prenons une lampe à incandescence, et faisons augmenter régulièrement la force électromotrice aux bornes à partir de zéro. L'intensité du courant qui traverse la lampe ira en augmentant et le filament s'échauffera progressivement; la puissance absorbée par la lampe est représentée en watts par le produit EI de la force électromotrice par l'intensité.

Tant que le filament n'est pas incandescent, une certaine quantité d'énergie est dépensée sans production de lumière; le rendement est donc nul. Au fur et à mesure que l'énergie dépensée dans la lampe augmente, le rendement lumineux devient plus grand. On constate que l'intensité lumineuse croît beaucoup plus vite que l'énergie dépensée (1).

Voici d'après les expériences faites par le Comité des essais de l'Exposition d'Anvers, les résultats obtenus avec une lampe Siemens, du type de 8 bougies.

Intensité lumineuse en bougies	3,6	4,3	6,2	3,9	10,3	10,9
Watts aux bornes	58,2	59,7	62,5	66,0	67.2	68,0
Intensité en Ampères	0,56	0,58	0,62	0,66	0,677	0,685
Watts dépensés	32,59	54,62	38.75	43,5	45,5	46,6
Watts par bougie	9	8	6,25	4,9	4.4	43

(1) *The maximum Efficiensy of Incandescent lamps. — Conférence à The American Institute of Electrical Engineers*, par John W. Howell, 10 avril 1888.

Les essais de ce comité ont montré que pour des régimes compris entre des limites qui ne sont pas trop éloignées, *l'intensité lumineuse des lampes à incandescence varie comme la sixième puissance des volts aux bornes, ou comme la même puissance de l'énergie dépensée dans la lampe.*

La figure 238, donne d'après M. Howell, les résultats obtenus sur des lampes Édison du type de 16 bougies ; on a porté sur l'horizontale la puissance absorbée par bougie et sur la verticale, les intensités lumineuses.

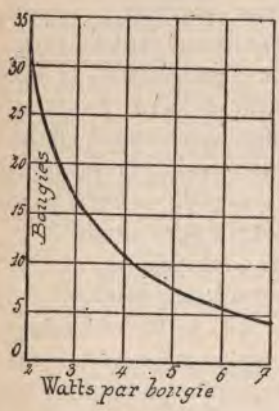


Fig. 238.

Seulement, comme nous l'avons dit plus haut, la vie de la lampe dépend de la température à laquelle le filament a été porté et par conséquent dans la puissance dépensée.

Ainsi une lampe Édison du type de 16 bougies, dans laquelle on dépense 48 watts ou 3 watts par bougie, dure de 1000 à 1200 heures, si on ne fait donner à cette même lampe que 10 bougies, on dépensera 40 watts ou 4 watts par bougie, mais sa vie sera portée à 6000 heures. D'autre part si l'on dépense 60 watts dans la même lampe, elle donnera une intensité lumineuse de 30 bougies, le rendement en lumière par Watt sera double; mais le filament se brisera au bout d'une centaine d'heures.

La figure 239 est un diagramme obtenu par la Compagnie américaine Édison, et qui indique d'après

des expériences de longue durée, la vie de lampes également bonnes marchant à des régimes différents.

Le régime le plus avantageux pour un type de lampes déterminé dépend de deux éléments savoir : du prix de la lampe en elle-même et le coût de la puissance. Si la force motrice coûte cher il y aura intérêt à faire marcher les lampes à un régime plus élevé que si l'on dispose d'une moteur économique, une chute d'eau par exemple.

Fig. 239.

M. Howell (1) a fait une étude très complète de la question pour des lampes de différentes valeurs et pour des coûts variables de la force motrice, le diagramme ci-contre (fig. 240) est extrait de ce travail. Il indique la dépense pour 100

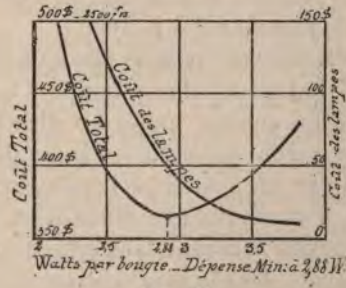


Fig. 240.

(1) John W. Howell. *Loc. cit.*

lampes du type de 16 bougies marchant pendant 1000 heures à différents régimes. Les lampes employées dans le cas de la figure coûtaient 50 cents chacune, soit 2,5 fr.; en les faisant marcher à raison de 3 watts par bougie, leur durée était de 1200 heures; enfin la force motrice coûtait 5 cents par HP, soit un peu plus de 25 centimes par cheval-heure. La figure montre que la dépense totale est la moins élevée lorsque la puissance dépensée dans les lampes est de 2.88 watts par bougie. Dans ces conditions le coût de 100 heures d'éclairage pour les 100 lampes se décompose comme suit : lampes 53 dollars soit environ 265 fr. Dépense totale 362 dollars soit 1810 fr. La dépense en lampes est donc les 0,146 du coût total.

Dans une installation bien faite la dépense pour le renouvellement des lampes s'élève à environ 10 p. 100 du total.

Au point de vue de la conservation des lampes, il importe que, dans une installation d'éclairage électrique par incandescence, la force électromotrice soit aussi constante que possible. Il faut faire en sorte que celle-ci ne varie pas de plus de 2 à 3 p. 100.

258. **Intensités lumineuses relatives dans les diverses directions.** — L'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence n'est pas la même suivant toutes les directions de l'espace. Vers la partie supérieure, l'ampoule se termine généralement par une pointe où l'épaisseur du verre est assez grande, il en résulte une diminution assez considérable du pouvoir éclairant dans cette direction.

Si l'on compare dans le plan horizontal les intensités lumineuses dans le plan du filament et dans des directions faisant avec celui-ci différents angles, on trouve généra-

lement un maximum dans la direction de 45°, lorsque le filament a une section rectangulaire, dans le cas d'un filament à section circulaire l'intensité lumineuse est sensiblement la même dans tous les azimuts. Dans ce cas, en effet, la surface lumineuse est la même quelle que soit la direction considérée, tandis que si l'on a des filaments rectangulaires, l'intensité maximum se produit dans la direction où deux faces du rectangle projettent leurs rayons.

259. **Arc voltaïque. — Expérience de Davy.** — Soient A et B deux tiges de charbon terminées en pointes, placées dans le prolongement l'une de l'autre (fig. 241) ; A étant mise en communication avec le pôle positif d'une pile puissante, et B relié au pôle négatif. Si l'on amène les deux charbons au contact, et puis qu'on les sépare à une distance de plusieurs millimètres, on voit jaillir entre les deux charbons une effluve continue d'un pouvoir éclairant extrêmement intense, à laquelle on a donné le nom d'*arc voltaïque*. Ce phénomène a été découvert par Davy, en 1802 ; il faisait usage de tiges en charbon de bois qu'il mettait en communication avec les pôles d'une pile à auges de 2000 éléments. Les extrémités des charbons entre lesquelles se produit l'arc sont portées à une température extrêmement élevée; aussi le charbon de bois employé se consumait rapidement dans l'air, et l'on ne pouvait songer à utiliser cette matière pour produire un éclairage industriel. La source de courant dont on disposait était également peu commode et ne pouvait fournir un courant constant que pendant un temps assez court. Aussi, l'expérience de Davy était restée sans application.

Fig. 241.

Foucault introduisit l'emploi de baguettes de charbons découpées dans le charbon compact qui se dépose dans les cornues à gaz ; ces électrodes se consumaient beaucoup moins vite, mais l'emploi de l'arc voltaïque n'est devenu industriel que depuis l'invention des machines dynamo-électriques de Gramme.

260. **Propriétés de l'arc voltaïque.** — Lorsque l'on examine les deux charbons entre lesquels jaillit l'arc, sous l'influence d'un courant continu, on observe que le charbon positif est le plus brillant des deux, sa température est plus élevée que celle du charbon négatif; en outre le premier se creuse de façon à présenter à son extrémité un cratère émettant une lumière éblouissante, tandis que le second présente une pointe dont la température est moins élevée que celle du pôle positif (fig. 241). Des particules de charbon incandescent se détachent du pôle positif et se précipitent d'une façon continue vers le pôle opposé, en outre le charbon positif s'use beaucoup plus rapidement que l'autre. Le charbon positif s'use environ deux fois plus vite que le négatif.

La température de l'arc est tellement élevée que l'on peut y fondre les corps les plus réfractaires, comme la platine et même le diamant.

Pour maintenir un arc bien stable il faut qu'il existe entre les deux charbons une force électromotrice de 40 à 50 volts.

L'arc électrique ne se comporte pas comme une simple résistance intercalée dans un circuit, sa résistance apparente, c'est-à-dire le rapport de la force électromotrice nécessaire pour faire passer un courant d'intensité donnée à cette intensité $\left(R = \frac{E}{I}\right)$ n'est pas proportion-

nelle à la longueur de l'arc; pour une même intensité de courant il ne faut pas, pour un arc de 4 millimètres, une force électromotrice double de celle qui était nécessaire lorsque l'arc était moitié moins long (1). Lorsque l'on maintient l'intensité du courant constante et que l'on fait varier la longueur de l'arc, on trouve que la force électromotrice nécessaire se compose d'une partie constante d'environ 30 volts et d'une partie variable proportionnelle à la longueur de l'arc et par conséquent à sa résistance électrique réelle. De sorte que la différence de potentiel, observée entre les deux charbons, serait $E = E_a + IR$.

R étant la résistance de l'arc en ohms.

En d'autres termes, l'arc électrique présente une force électromotrice E_a opposée à celle de la source, qui est d'environ 30 à 40 volts lorsque l'intensité du courant varie de 5 à 15 ampères.

Lorsque l'arc est très court, il produit un sifflement particulier sa force contre-électromotrice tombe à 20 volts et sa lumière devient très variable.

On trouve d'ailleurs par expérience que l'on ne peut maintenir un arc voltaïque fixe avec moins de 25 éléments Bunzen montés en tension.

On n'a pas encore donné une explication bien satisfaisante de cette force contre-électromotrice.

Pour avoir pratiquement un arc bien stable, il faut une tension variant de 42 à 52 Volts; en dessous de ce chiffre l'arc siffle et son éclat est variable. Pour une force électromotrice plus élevée, l'arc se rompt trop

(1) Pour l'étude détaillée des différents systèmes de lampes à arc, voir *Arc lamps and their Mechanism*, par le prof. Sylvanus P. Thomson Conférence faite à la Société des Arts, de Londres, le 6 mars 1889.

facilement et le fonctionnement n'est plus régulier.

Nous avons dit que le charbon positif s'use deux fois plus rapidement que le négatif; il résulte des essais de M. le professeur Rousseau, que le rapport n'est pas tout à fait aussi simple (1); lorsque l'arc est court, le rapport de l'usure du charbon positif à celle du négatif est plus grand que quand l'arc est long.

Pour des tensions variant de 41 à 51 Volts, le rapport des consommations varie de 3,2 à 2.

La consommation totale du charbon est approximativement de 2 grammes par heure par 100 Watts de puissance dépensés dans l'arc. Ce chiffre varie avec la qualité des charbons, il est d'autant plus petit que ceux-ci sont plus denses et moins faciles à désagréger. Il est avantageux sous ce rapport de faire marcher les lampes avec une force électromotrice aussi élevée que possible.

Afin que le centre du cratère se forme toujours bien au centre du charbon positif, celui-ci n'est pas homogène, pendant la fabrication on laisse suivant l'axe une ouverture de 1 à 2 millimètres de diamètre que l'on remplit après coup d'une pâte de charbon plus friable. Le charbon négatif est homogène.

261. **Emploi des courants alternatifs.** — On peut produire l'arc voltaïque au moyen des courants alternatifs, dans ce cas, l'usure des deux charbons est la même, lorsqu'ils sont tous les deux horizontaux ou verticaux placés parallèlement. Quand ils sont verticalement dans le prolongement l'un de l'autre, le supérieur s'use un peu plus vite que l'inférieur.

Les lampes à courant alternatif produisent un sifflement particulier, d'autant plus aigu que le nombre

(1) Voir également S.-P. Thompson. *Loc. cit.*

des périodes du courant par seconde est plus grand.

282. **Intensités relatives des rayons émis sous différentes inclinaisons par l'arc voltaïque, dans le cas de courants continus** (1). — Nous supposons les charbons placés verticalement.

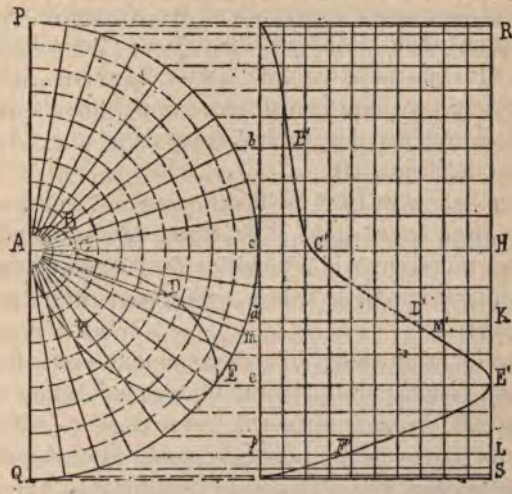


Fig. 167.

Lorsque la lampe est bien réglée et que les deux charbons sont bien dans le prolongement l'un de l'autre, les intensités lumineuses mesurées dans différents azimuts ont la même valeur, mais il n'en est pas de même des intensités mesurées sous diverses inclinaisons. L'intensité maximum a lieu pour une inclinaison d'environ 40° sous l'horizon.

Si du point A, pris comme centre, nous décrivons des

(1) Comptes rendus des essais électriques de l'Exposition d'Anvers. — Rapport de M. le professeur Rousseau. *Loc. cit.*

circonférences ayant respectivement pour rayons 0,1 — 0,2 — 0,3, etc., la longueur AP étant prise comme unité, et si nous menons du point A des rayons faisant entre eux un angle de 10°, suivant tous ces rayons portons des longueurs représentant les intensités relatives des rayons émis dans ces directions, l'intensité maximum AE étant prise comme unité. La ligne ABCDEF réunissant les points ainsi obtenus permet d'apprécier l'intensité relative des rayons émis dans une direction donnée, telle que AD.

De la ligne ABCDEF on déduit, par une construction simple, une autre ligne P'B'C D' au moyen de laquelle on peut représenter la répartition de l'éclairage dans les différentes zones de la sphère ayant pour centre le point lumineux.

Pour déterminer les différents points de cette ligne, il suffit de mener par les points où les prolongements des rayons AB, AC... rencontrent la circonférence PEQ des horizontales, et de prendre sur ces droites, à partir de leur rencontre avec P'Q' menée à la distance Ac = 1 du point A, des longueurs égales à celles qui représentent les intensités lumineuses suivant les directions correspondantes, par exemple, *b*B' = AB.

Si l'on considère la surface de la sphère ayant comme rayon AQ = 1 ayant pour centre le point lumineux A, une zône comprise entre deux plans horizontaux menés par deux points quelconques, par exemple, *d* et *f*, l'éclairage moyen de cette zone rapporté à l'éclairage produit par les rayons d'intensité maximum, est représenté par le rapport de la surface *d*D'E'F'*f* à la surface du rectangle *d*KL*f* ayant pour base *df* et pour hauteur l'unité.

L'intensité moyenne sphérique, c'est-à-dire l'intensité

d'une source lumineuse émettant uniformément des rayons dans toutes les directions de l'espace, et qui projetterait sur une sphère de rayon égal à l'unité, la même quantité de lumière que celle qui est projetée par la source considérée, serait représentée par le rapport de la surface totale comprise entre la ligne P'C'E'Q' et la droite P'Q' à la surface du rectangle P'RSQ'.

Pour démontrer cette propriété de la ligne P'C'E'Q', considérons la zône limitée par deux rayons voisins Ad et Am. La hauteur de cette zône est égale à dm et sa surface peut être considérée comme étant égale à $2\pi \times dm$, ($r = 1$), AD et AM étant pris suffisamment rapprochés. La quantité de lumière reçue par cette zône est égale à $2\pi\, idm$, i étant l'intensité suivant la direction AD. La surface dD'mM' est très approximativement égale à $dm \times i$; par conséquent la quantité de lumière reçue par la zône de la sphère limitée par les deux cônes engendrés par AD et AM est égale à $2\pi \times$ surface dD'mM'. En appliquant le même raisonnement à une série de zônes de petites dimensions dans lesquelles on décompose la surface de la sphère comprises entre AD et AF, on trouve que $2\pi \times$ surface dD'E'F'f représente la quantité de lumière qui tombe sur la sphère dans la zône limitée par AD et AF.

Le produit $2\pi \times$ surface P'C'E'Q' représentera donc la quantité totale de lumière envoyée par le foyer sur toute la surface de la sphère dont ce foyer occupe le centre.

L'éclairage moyen de la zône s'obtiendra en prenant le quotient de la quantité totale de lumière qu'elle reçoit divisée par sa surface, c'est-à-dire :

$$\frac{\text{Surface } dD'E'F'f}{df}.$$

Or ce quotient n'est autre que le rapport de la surface *d*D'E'F'*f* à celle du rectangle *d*KL*f* qui a pour hauteur l'unité.

De même l'intensité moyenne sphérique serait le quotient de la quantité totale de lumière qui éclaire la sphère et qui a pour expression $2\pi \times$ surface P'C'E'Q, divisée par la surface de la sphère 4π; or ce quotient qui a pour valeur $\frac{\text{surface } P'C'E'Q'}{2}$ est également le rapport des surfaces P'C'E'Q' et P'RSQ'. celle-ci ayant pour base P'Q' = 2 et pour hauteur Q'S = 1.

En se bornant à une grossière approximation, on pourrait se faire une idée assez exacte de la répartition de la lumière entre les différentes zônes en remplaçant la courbe P'C'E'Q' par les lignes droites de façon à la décomposer en trapèzes; on arrive ainsi à des résultats qui concordent assez bien avec ceux donnés par la formule empirique $S = \frac{H}{2} + \frac{M}{10}$ proposée par la Commission des essais de l'Exposition de Paris, en 1881, formule dans laquelle S représente l'intensité moyenne sphérique, H l'intensité horizontale, et M l'intensité maximum.

En général, l'intensité moyenne sphérique varie de 0,35 à 0,40 de l'intensité maximum.

La forme de la courbe du diagramme (fig. 242) dépend de la longueur de l'arc et de la qualité des charbons.

263. **Répartition de la lumière dans le cas des courants alternatifs.** — Lorsque l'on fait usage des courants alternatifs, la répartition de la lumière est la même au-dessus et en-dessous du plan horizontal; les charbons se taillent tous les deux en pointe.

L'intensité maximum se trouve dans le plan horizontal passant par l'arc ; et l'intensité moyenne sphérique est égale à 0,9 de l'intensité maximum.

A égalité de puissance dépensée dans l'arc, les lampes à courants continus projettent donc en-dessous du plan horizontal une quantité de lumière beaucoup plus grande que les foyers alimentés par les courants alternatifs. Il en résulte que sous ce rapport les lampes du premier système sont plus avantageuses lorsqu'il s'agit d'éclairer un grand espace puisque la presque totalité de la lumière est projetée vers le bas sur la surface à éclairer.

264. **Bougies Jablochkoff.** — Les courants alternatifs s'emploient généralement pour alimenter les lampes du genre de celle inventée par Jablochkoff et auxquelles on a donné le nom de *bougies électriques*.

Les bougies électriques se composent de deux crayons en carbone A et B (fig. 243), de 4 millimètres de diamètre et d'environ 25 centimètres de longueur ; ces deux crayons sont séparés l'un de l'autre par une matière isolante, généralement un colombin en kaolin ou en plâtre.

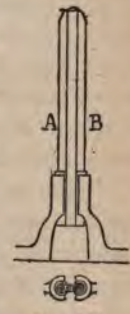


Fig. 243.

L'extrémité de la lampe est garnie d'une mèche imprégnée de plombagine ou d'une pâte de charbon finement pulvérisée. Lorsque l'on établit le courant, cette mèche s'échauffe fortement, se brûle et l'arc s'établit ainsi entre les deux crayons A et B. Comme on emploie des courants alternatifs, les deux charbons s'usent avec la même vitesse et l'isolant qui les sépare est volatilisé au fur et à mesure de la consommation des charbons.

Ces lampes présentent l'inconvénient suivant : lorsque l'arc s'éteint par suite d'une cause quelconque, arrêt du courant ou rupture d'un morceau de charbon, il ne peut plus se rallumer puisque pour que l'arc se produise il faut au préalable établir le contact entre les deux électrodes.

La durée d'une bougie de 25 centimètres de long est d'environ de 2 heures, de sorte que pour un éclairage de longue durée, il faut placer 4, 5 ou 6 bougies dans la même lanterne et on les intercale successivement dans le même circuit au moyen d'un commutateur, au fur et à mesure de leur extinction.

Ce système, qui date de 1877, est le premier qui ait rendu pratique l'éclairage électrique par foyers divisés alimentés par la même machine. Depuis il a perdu beaucoup de son importance, mais il peut encore être appelé à rendre de grands services par suite de l'emploi des transformateurs dont il sera question plus loin.

265. **Lampes à arc à courant continu.** — Les lampes à arc sont celles dans lesquelles la production de la lumière est basée sur l'expérience de Davy (259). L'arc électrique doit s'y produire dès que l'on établit entre les deux charbons une différence de potentiel de 40 à 50 volts. La lampe doit donc être disposée de manière :

1° Que les charbons soient mis en contact, puis séparés dès que le courant est établi, de façon qu'il y ait production d'un arc voltaïque, c'est ce qui constitue le dispositif *d'allumage*.

2° Les charbons se consumant petit à petit, il faut que la lampe soit disposée de façon à rapprocher automatiquement les charbons au fur et à mesure de leur usure et à maintenir ainsi constante la longueur de l'arc c'est le système de *réglage*.

Ce sont là les fonctions essentielles de la lampe, mais celle-ci peut encore être appelée à remplir un troisième rôle.

3° Les lampes à arc peuvent être groupées de deux façons, en parallèle ou en dérivation sur deux conducteurs A et B maintenus à une différence de potentiel constante (fig. 244*a*) ou bien (fig. 244*b*) toutes les lampes placées en tension peuvent être parcourues par un même courant dont l'intensité doit être maintenue constante. Dans ce dernier cas, lorsque l'une des lampes vient à s'éteindre il faut : 3° *qu'une résistance équivalente à celle de la lampe éteinte soit intercalée automatiquement dans le circuit afin que l'intensité du courant ne soit pas changée.*

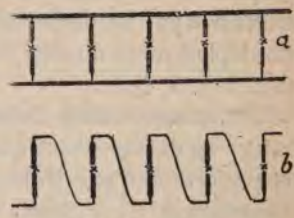


Fig. 244.

On peut rendre le charbon inférieur (négatif) fixe et laisser descendre le charbon supérieur (positif) au fur

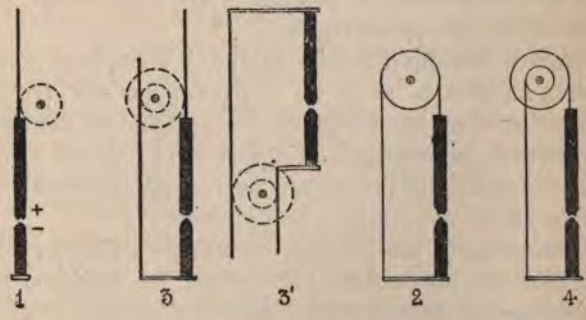


Fig. 245.

et à mesure de l'usure dans ce cas (fig. 245,1), le point lumineux descend petit à petit.

On peut rendre les deux électrodes solidaires au moyen d'une cordé passant sur une poulie (fig. 245, 2), mais comme les charbons s'usent inégalement, le point lumineux se déplace, mais moins que dans le cas précédent.

Enfin, si l'on veut que la source lumineuse conserve toujours la même position, on rend les deux charbons solidaires par un dispositif assurant à l'électrode positive un déplacement double de celui de l'électrode négative (fig. 245, 3, 4).

266. **Lampe Foucault Duboscq. Lampe Jaspar.** — Le premier régulateur électrique a été construit par Foucault et perfectionné par Duboscq en 1849. Il comprend un mouvement d'horlogerie dont le moteur est un ressort comme celui d'une montre ou d'une pendule ; ce mouvement commande le rapprochement ou l'éloignement des charbons au moyen de roue dentées, attaquant des crémaillères fixées aux porte-charbons. L'armature d'un électro-aimant, placé dans le circuit, arrête le mouvement lorsque l'intensité du courant arrive à la valeur pour laquelle la lampe est réglée.

Serrin a simplifié cette lampe, il a employé comme force motrice le poids du charbon supérieur, tant que l'aimant n'est pas parcouru par un courant d'intensité suffisante, les charbons se rapprochent ; quand l'intensité est suffisante le système de rouages qui rendent les deux charbons solidaires est enclanché.

M. Jaspar a perfectionné les lampes à solénoïde dont la première idée est due à *Archereau*. Les deux charbons sont rendus solidaires par le dispositif indiqué fig. 245, 4 ; le charbon négatif est porté par une tige en fer pé-

nétrant dans un solénoïde parcouru par le courant.

Le poids du porte-charbons supérieur tend toujours à ramener les deux électrodes en contact ; dès que le courant est établi, l'attraction du solénoïde a pour effet d'écarter les deux charbons jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre l'attraction exercée par le solénoïde et le poids moteur. Lorsque l'écartement des charbons augmente, l'intensité du courant diminue et en même temps l'attraction du solénoïde, de sorte qu'il y a rapprochement des électrodes jusqu'à ce que l'équilibre soit établi.

Cette lampe est d'un réglage facile et d'un fonctionnement très régulier, seulement elle présente, comme les précédentes, un défaut grave; il est impossible de mettre plusieurs de ces lampes sur le même circuit, parce que la variation de l'arc dans l'une d'elles se ferait sentir sur toutes les autres, si plusieurs lampes A, B, C sont placées en tension, si, par exemple, l'arc en A est trop long alors qu'il est normal en B et C, l'intensité du courant va en diminuant jusqu'à ce qu'il y ait rapprochement en A, mais en même temps les charbons se rapprocheraient également en B et C d'une façon intempestive puisque la force d'attraction, dans chaque lampe, est réglée par l'intensité du courant et est, par conséquent, la même pour toutes.

Chaque lampe doit être alimentée par une source différente, il faut donc autant de dynamos et de circuits qu'il y a de foyers, c'est pourquoi on les désigne sous le nom de *lampes monophotes*.

267. **Lampes différentielles.** — Pour rendre les lampes indépendantes l'une de l'autre, on place une bobine de fil fin en dérivation entre les deux bornes de la lampe, cette dérivation a une résistance qui varie de 40 à 100

fois la résistance apparente de l'arc suivant les systèmes. Lorsque la longueur de l'arc augmente, la partie du courant passant par la dérivation devient plus grande et on utilise la variation de ce courant pour produire le réglage de la lampe.

Si une lampe vient à s'éteindre, le circuit n'est pas interrompu, la continuité étant maintenue par la bobine placée en dérivation. Le courant total reste ainsi à peu près constant et le réglage de chaque appareil se fait d'une façon indépendante.

268. — Pour une lampe destinée à fonctionner en série il faut donc (fig. 246) :

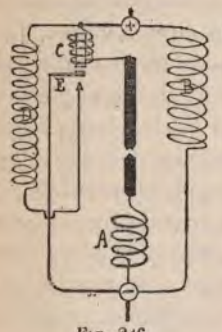


Fig. 246.

1° Un électro-aimant A pour produire l'allumage.

2° Une bobine B à fil fin placée en dérivation, destinée à laisser passer une partie du courant et à régler la longueur de l'arc.

3° Un électro-aimant C attirant une armature E tant que la lampe fonctionne et remplaçant celle-ci par une dérivation D de résistance équivalente dès que l'arc s'éteint. Ainsi si nous supposons une lampe marchant à 10 ampères et 50 volts, D devra avoir une résistance de $\left(\frac{E}{I}\right)$ de $\frac{10}{50} = 0,2$ d'ohm. Celle-ci devra être constituée par un fil d'assez gros diamètre pour que l'échauffement ne soit pas trop considérable.

Lorsque les lampes sont placées en dérivation l'extinction de l'une d'elles n'entraîne pas celle des autres, et par conséqueent C, E et D peuvent être supprimées.

269. **Princianux types de lampes à arc.** — Les lampes les plus répandues dans l'industrie peuvent se rapporter pour la plupart aux types suivants :

I. *Lampes à solénoïdes.* — Nous allons décrire la lampe Piette et Krizik (appelée quelque fois lampe Pilsen), destinée à fonctionner en série; cette lampe présente les différentes parties dont nous avons parlé au paragraphe précédent.

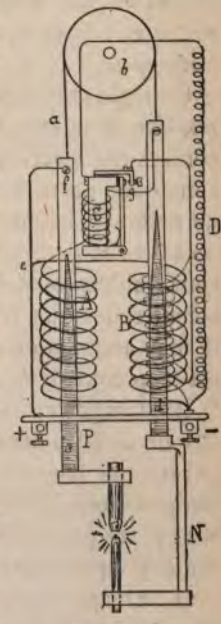


Fig. 247.

Les deux porte-charbon P et N sont rendus solidaires par une corde passant sur une poulie *b*. Ils sont formés par des tubes en laiton dans lesquels se trouvent deux morceaux de fer doux *c* et *d*, terminés en pointe pour que l'action du solénoïde reste à peu près constante quelle que soit la position du fer doux.

Lorsqu'aucun courant ne passe, les charbons sont amenés au contact par suite du léger excédant de poids que l'on donne à l'électrode positive. Dès que le courant est établi il entre par la borne + de la lampe, en *e* se présentent deux chemins, la majeure partie prend le moins résistant par *f* P N, l'électro-aimant C, le solénoïde A à gros fil et sort par la borne -. L'électro-aimant C attire son armature et la résistance D en dérivation sur le solénoïde à fil fin B, est mise en dehors du circuit.

Le courant, à partir de ce moment, se partage entre A et B en raison de leurs résistances respectives. Lorsque la longueur de l'arc augmente, l'intensité du courant en B croît, il en résulte que l'attraction sur le fer doux *d* devenant plus forte que l'action de A sur *c*, l'arc se raccourcit jusqu'à ce que sa longueur soit devenue normale.

On règle cette lampe de la façon suivante : l'électrode positive doit être suffisamment lourde pour qu'il y ait contact des deux charbons quand le courant est interrompu, en outre il faut régler par tâtonnement l'excédent de poids de façon que pour une différence de potentiel de 45 volts par exemple aux bornes, l'intensité du courant qui parcourt les charbons et la longueur de l'arc, soient celles que l'on veut obtenir. Si l'arc est trop long il faut augmenter le poids de l'électrode positive; s'il est trop court il faut diminuer le poids.

Ces lampes se règlent une fois pour toutes dans l'atelier du constructeur.

Lorsque par suite d'une circonstance quelconque, la lampe s'éteint, C cesse d'attirer son armature, et le courant passe par A, le gros fil de B le contact G et la résistance D équivalente à celle de l'arc.

II. *Lampe différentielle à frein.* — Les lampes à frein dont il existe un grand nombre de systèmes, reposent toutes sur le principe suivant : le charbon positif tend toujours à descendre par son propre poids; le porte-charbon supérieur est taillé en crémaillère et actionne un volant A par l'intermédiaire d'un pignon denté (fig. 248). Contre le volant vient s'appuyer un sabot B porté par un levier solidaire d'une pièce de fer doux C qui est sollicitée à la fois par deux solénoïdes l'un D à gros fil parcouru par le cou-

rant principal, l'autre E à fil fin en dérivation sur les charbons. Le charbon négatif est porté par une pièce de fer doux formant l'armature d'un électro-aimant F. Quand aucun courant ne parcourt la lampe, le charbon supérieur, par suite de son poids, vient en contact avec le négatif.

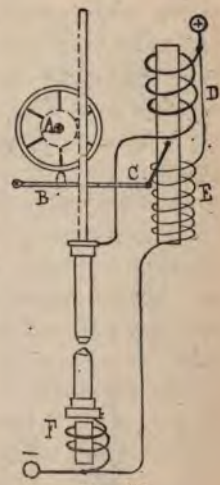


Fig. 248.

Aussitôt que l'on ferme le circuit, F attire son armature, écarte les charbons, l'arc s'allume. Quand l'arc devient trop long l'attraction de E l'emporte sur celle de D, le frein se desserre légèrement, le charbon supérieur descend jusqu'à ce que la longueur de l'arc soit devenue telle que l'attraction de D soit suffisante pour arrêter la descente.

III. *Lampe en dérivation à déclenchement.* — Le type de ce groupe est la lampe de Gramme. Comme dans la lampe précédente la tige porte-charbon supérieure sert de moteur, elle actionne une étoile *a* (fig. 249) par l'intermédiaire d'un mouvement d'horlogerie.

Le porte-charbon inférieur est sollicité vers le haut par deux ressorts R.

L'allumage se produit par l'attraction de l'électro-aimant A sur armature *b* qui est solidaire du charbon négatif.

Le réglage est produit par un électro-aimant B à fil fin, *placé en dérivation sur l'arc*. L'armature *c* de ce dernier est portée par un levier *d*. Quand le courant devient

trop fort dans la dérivation, l'armature *c* est attirée et le charbon peut descendre; mais à ce moment le courant qui parcourt B est interrompu en *e*, l'action du ressort R′ ramène l'armature à sa position initiale, l'étoile *a* est de nouveau enrayée. Ce mouvement de va et vient du levier se produit jusqu'à ce que l'attraction du ressort R′ l'emporte sur celle de l'électro-aimant.

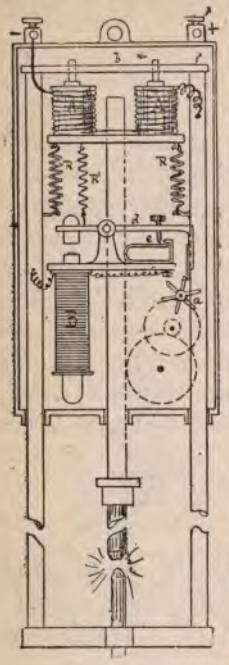


Fig. 249.

Plus le ressort R′ sera tendu, plus grande devra être l'intensité du courant qui parcourt la dérivation pour que la lampe se règle, et par conséquent l'arc pourra devenir d'autant plus long.

270. — Comme nous l'avons vu (265), on peut adopter deux systèmes de montage différents : en dérivation ou à potentiel constant ou bien en tension à courant constant.

Dans le premier cas, lors de l'allumage d'une lampe, avant que l'arc soit formé, le courant ne rencontrerait d'autre résistance que celle de l'électro-aimant de la lampe et des charbons, c'est-à-dire 0,4 à 0,5 d'ohm, pour une lampe de 10 ampères, le courant pourrait atteindre une valeur extrêmement considérable au moment de l'allumage, l'intensité pourrait être suffisante pour détruire la lampe. En outre, pendant la marche, lorsque les crayons se rapprocheraient, le courant pourrait augmenter d'une façon dangereuse.

Pour obvier à ces inconvénients ont est obligé d'intercaler sur le circuit de chaque lampe une résistance inerte assez considérable.

Pour des lampes placées en simple dérivation, il faut employer généralement une résistance qui détermine une chute de potentiel de 20 volts. De sorte que pour 45 à 50 volts utiles aux bornes de la lampe il doit y avoir une différence de potentiel de 65 volts entre les conducteurs. Environ 1/3 de la puissance dépensée est donc absorbée par l'échauffement de la résistance inerte.

Dans le cas de plusieurs lampes en tension, celles-ci tiennent lieu de résistance quand le nombre est suffisant, de sorte que l'utilisation de l'énergie électrique est plus complète. Ainsi quand on place les lampes en dérivation par séries de deux en tension, il suffit d'avoir 110 volts entre les deux conducteurs principaux, de cette chute de potentiel on utilise 90 volts, on ne perd donc que $\frac{20}{110}$ ou environ 18 p. 100 de l'énergie dépensée.

Voici d'après le professeur S.-P. Thompson, comment se partage la chute de force électromotrice pour une lampe de 10 ampères marchant avec 55 volts aux conducteurs :

Force contre électromotrice de l'arc	39	volts.	
Chute de potentiel due à la résistance réelle de l'arc	2	»	
Chute de potentiel due à la résistance des charbons	3	»	Variable avec la longueur.
Chute de potentiel due à la résistance des bobines de la lampe .	1	»	
Chute de potentiel due à la résistance inerte	10	»	
Total .	55	volts.	

271. **Rendement lumineux des lampes à arc.** — La puissance dépensée dans une lampe à arc varie de 0,5 à 0,8 de Watt par bougie, mais à ce chiffre il faut ajouter la puissance perdue dans la résistance inerte qui peut s'élever à 0,45 de la puissance utile quand les lampes sont montées en simple dérivation, la dépense totale peut varier de $0,8 + 0,45 \times 0,8 = 1,16$ Watt par bougies pour les petits foyers de 4 à 5 ampères montés en simple dérivation à 0,5 Watt pour des arcs plus puissants en tension.

Les lampes à incandescence de 16 bougies, type le plus généralement admis, absorbent généralement 3 Watts par bougie, c'est ce qui explique pourquoi on n'emploie jamais ces lampes pour l'éclairage de grands espaces.

272. **Effet de la résistance des charbons de la lampe.** — Pour une lampe de 8 à 10 ampères on emploie généralement des charbons de 10 millimètres de diamètre, la résistance spécifique étant de 7,500 microhms, la résistance de 60 centimètres qui se trouvent généralement dans la lampe, sera de 0,35 d'ohms, ce qui est insignifiant vis-à-vis de la résistance inerte lorsqu'il s'agit de lampes en dérivation. Il n'en est plus de même quand les lampes sont en tension ; en effet, si nous prenons un circuit de 20 lampes au moment où l'on a renouvelé les charbons dans toutes les lampes, la résistance de ceux-ci est de 13 ohms, ce qui pour 10 ampères détermine une perte de 130 volts. Cette résistance peut être réduite au dixième en recouvrant les charbons d'une couche de cuivre par la galvanoplastie, c'est ce qui se pratique quand on met un grand nombre de lampes en série. En outre

les charbons cuivrés s'usent moins vite que les autres, mais ils donnent en se consumant une coloration verte désagréable à la vue qui les a fait abandonner d'une façon presque générale sur le continent.

CHAPITRE XXI

ÉLECTRO-CHIMIE. — GALVANOPLASTIE. — ACCUMULATEURS

273. **Anode. — Cathode.** — Nous avons vu (81), qu'un courant passant à travers un liquide composé, en sépare les éléments; le corps ainsi décomposé porte le nom d'*électrolyte*, et les constituants qui en sont séparés s'appellent les *ions*. Dans le voltamètre à eau acidulée (fig. 61) le courant entre par la borne B, *monte* par l'électrode *b*, et *descend* par *c* et la borne C. L'électrode *b* réunie au pôle positif porte le nom d'*anode* (d'un verbe grec qui signifie monter), l'électrode *c* par laquelle le courant descend a été appelé *cathode* (du mot grec qui signifie descendre); ces dénominations qui étaient justifiées par la forme que l'on donnait aux voltamètres à l'origine, sont conservées bien que aujourd'hui les appareils où se font les décompositions de sels métalliques aient généralement la forme représentée figure 62, dans lesquelles le courant descend par l'électrode positive et remonte par l'électrode négative.

L'*anode* est donc l'électrode en communication avec le pôle positif de la source d'électricité et par conséquent celle par où entre le courant; celui-ci allant du pôle + au pôle —, sort par la *cathode* qui est réunie au pôle négatif de la source.

274. **Force électromotrice de polarisation.** — L'expérience décrite au § 124 (fig. 95), montre que dès qu'un courant a séparé les constituants d'un électrolyte, ceux-ci tendent

à se réunir en vertu de leur affinité chimique et qu'il résulte de là une force électromotrice de sens contraire à celle de la source d'électricité. La grandeur de cette force *électromotrice de polarisation* dépend de la nature des éléments en présence. *Pour qu'il y ait électrolyse, il faut que la force électromotrice de la source d'électricité soit plus grande que la force électromotrice de polarisation des éléments séparés.* Ainsi comme nous allons le montrer un seul élément Daniell ne peut produire la décomposition de l'eau.

275. **Équivalent électro-chimique.** — Nous savons que l'on appelle *équivalent électro-chimique* d'un corps, *le poids de ce corps mis en liberté par un coulomb d'électricité*, ou ce qui revient au même, *le poids de ce corps mis en liberté pendant 1″ par un courant d'un Ampère.*

Voici les équivalents électro-chimiques de quelques corps :

	Équivalent électrochimique par Coulomb.	
Hydrogène	0,000010384	grammes
Argent.	0,00111800	»
Cuivre	0,00032709	»
Zinc.	0,00033696	»
Plomb.	0,00107160	»
Nickel	0,00030425	»
Oxygène	0,00008286	»

Pour obtenir la quantité d'électrolyte mis en liberté par un courant de 1 ampère pendant une heure, il suffit de multiplier l'équivalent électrochimique par 3600. Ainsi un courant d'un ampère met en liberté 1 gr. 177 de cuivre par heure et dans le même temps il dépose 4 gr. 025 d'argent.

276. **Calcul de la force électromotrice nécessaire pour qu'il y ait électrolyse.** — Appelons E_p, la force électromotrice de polarisation ; pour faire passer une quantité d'électricité de 1 coulomb, malgré une force contre-électromotrice de 1 volt, il faut faire un travail de 1 Joule; pour faire traverser notre électrolyte par 1 Coulomb, il faudra donc faire un travail $T = E_p$ Joules ; pour Q Coulombs mettant en liberté un poids aQ d'un composé dont l'équivalent électro-chimique est a ; il faudra un travail de $Q \times E_p$ Joules. D'autre part nous savons qu'un gramme de l'élément considéré, lorsqu'il entre en combinaison, développe une quantité C de chaleur; le poids aQ développera donc aQC calories, ce qui correspond à $aQCW$ Joules, W étant l'équivalent en Joules d'une calorie (équivalent mécanique de la chaleur). Nous pouvons poser en vertu de la loi de la conservation et de la transformation de l'énergie l'égalité.

$$Q \times E_p = aQCW \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

d'où $E_p = aCW$ . . . . . (2)

Par conséquent la force électromotrice produite lorsqu'un corps déterminé entre dans une combinaison ou une décomposition chimique est égale à la quantité de chaleur produite par la combinaison d'un équivalent électro-chimique du corps considéré, multipliée par l'équivalent mécanique de la chaleur (exprimée en unités C. G. S.)

277. **Exemples.** — I. *Quelle est la force électromotrice nécessaire pour décomposer l'eau?*

L'équivalent électro-chimique de l'hydrogène

$$= 0{,}000010384.$$

La chaleur de combinaison de 1 gr. d'H = 34000 calories Gramme degré.

L'équivalent mécanique de la chaleur = 4,16.

(1 calorie gramme degré, correspond à 41600000 ergs. ou à 4,16 Joules).

$$E_p = 0{,}000010384 \times 34000 \times 4{,}16 = 1{,}47 \text{ volt.}$$

II. — *Quelle est la force électromotrice nécessaire pour décomposer une solution de sulfate de cuivre?*

La chaleur de combinaison de 1 gr. de cuivre avec l'acide sulfurique = 910 calories gr. d.

$$E^p = 0{,}00032709 \times 910 \times 4{,}16 = 1{,}23 \text{ volt.}$$

III. — *Calculer la force électromotrice d'un élément Daniell.*

Dans un élément Daniell, nous avons d'une part formation de sulfate de zinc, ce qui donne lieu à une force électromotrice : la chaleur dégagée par gramme de zinc dissous étant de 1670 cal. gr.

$$E_1 = 0{,}00033696 \times 1670 \times 4.16 = 2{,}34 \text{ volts.}$$

De cette force électromotrice nous devons déduire celle qui est nécessaire pour la décomposition de sulfate de cuivre au pôle positif.

Il restera donc disponible entre les deux pôles

$$2{,}34 - 1{,}23 = 1{,}11 \text{ volt.}$$

IV. — *Quelle est la force électromotrice nécessaire pour décomposer de sulfate double de Nickel et d'Ammoniaque?*

$$E_p = 0{,}00030425 \times 1484 \times 4{,}16 = 1{,}87 \text{ volts.}$$

278. **Décomposition des sels métalliques. — Galvanoplastie.** — Prenons une cuve contenant une dissolution d'un sel métallique, par exemple du sulfate de cuivre (fig. 250) le courant entrant par l'anode A, et sortant par la cathode B. Le sulfate de cuivre sera décomposé, et le cuivre transporté dans le sens du courant viendra se déposer sur la cathode tandis que l'acide sulfurique, élément électro-négatif cheminera dans le sens opposé au courant et viendra vers le pôle positif constitué par l'anode A.

Si cette anode est en platine, l'acide sulfurique restera en dissolution dans le liquide et la dissolution ira en s'appauvrissant en sulfate de cuivre, mais si l'anode est constituée par un métal attaquable, l'élément négatif mis en liberté se combinera au métal de l'électrode positive et si dans le cas actuel l'anode est formée d'une feuille de cuivre, il se reformera une quantité du sulfate de cuivre égale à celle qui a été décomposée par le courant, et la richesse en cuivre de la solution restera la même.

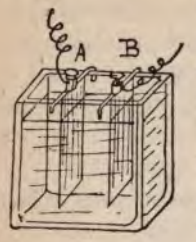


Fig. 250.

Le métal qui se dépose sur la cathode pour ainsi dire molécule à molécule, prendra exactement la forme de celle-ci, et si au bout d'un certain temps on détache le dépôt, on verra qu'il est le moulage exact de l'électrode négative; ce dernier fait a été découvert en 1836, par Delarue. Si donc on emploie comme cathode un moulage formé d'une matière conductrice d'un objet quelconque, le dépôt de métal qui s'y formera sera la reproduction exacte de l'objet en question, c'est là ce qui constitue la *galvanoplastie* inventée en 1839 par Jacobi, à Saint-Pétersbourg.

Pour obtenir la reproduction galvanique d'un objet, il faut donc commencer par en prendre un moule au moyen d'une matière appropriée, plâtre, cire, gutta-percha, plomb. Cette matière ne doit pas être attaquable par la solution métallique dans laquelle elle devra être plongée.

Lorsque l'on prend l'empreinte de l'objet à reproduire au moyen d'une substance isolante, comme le plâtre, la

cire ou la gutta-percha, il faut que la partie sur laquelle le métal viendra se déposer soit rendue conductrice, pour cela on l'induit d'une couche de plombagine réduite à l'état impalpable, cette pellicule de matière conductrice, quoique assez mince pour ne pas empâter les détails du moule, donne un passage suffisant à l'électricité pour permettre le dépôt métallique; dès que celui-ci est formé, il forme lui-même la cathode.

On peut aussi employer la galvanoplastie pour recouvrir des objets en métal d'une couche d'un métal différent, par exemple, on peut ainsi dorer, argenter, nickeler, des pièces de cuivre, de laiton, etc. Dans ce cas il est indispensable que la pièce métallique formant cathode et que l'on veut recouvrir, ne soit pas attaquée par le bain lui-même.

279. **Galvanoplastie du cuivre. — Electrotypie.** — Les opérations industrielles de la galvanoplastie du cuivre comprennent : la reproduction d'objets d'art, statues, médailles, etc., le cuivrage d'objets en métal, statuettes en zinc coulé, statues en fonte, et enfin la branche de la galvanoplastie connue plus spécialement sous le nom d'*électrotypie* a pour but la reproduction des gravures en bois ou acier pour servir à l'impression.

Lorsqu'il s'agit de reproduire en cuivre une statue, une médaille ou une gravure destinée à l'impression, on commence toujours par prendre le moulage de l'objet, comme nous l'avons dit plus haut, la partie du moule sur laquelle le métal doit venir se déposer doit être rendue suffisamment conductrice pour laisser passer le courant; généralement on enduit l'empreinte de plombagine réduite en poudre impalpable. Ce moulage est ensuite suspendu dans une cuve contenant une solution concen-

trée de sulfate de cuivre et réunie au pôle négatif de la source d'électricité le pôle positif étant relié à l'anode.

280. **Bain simple.** — Le sulfate de cuivre ne demandant qu'une faible force électromotrice pour être décomposé (277), dans les ateliers dont la production n'est pas très considérable on se borne à faire la décomposition dans de grands éléments Daniell, dont le pôle positif est constitué par le moule sur lequel le cuivre doit venir se déposer. Dans une cuve en grès ou en bois garnie intérieurement de gutta-percha (fig. 251), on place la solu-

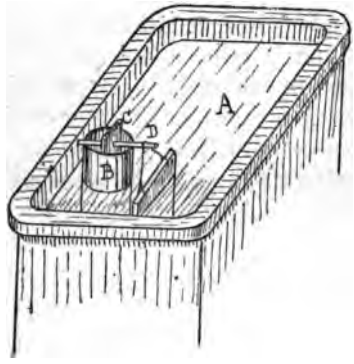


Fig. 251.

tion de sulfate de cuivre; celle-ci doit toujours être saturée, pour cela on y suspend des paniers en terre ou en gutta-percha, contenant du sulfate en cristaux; en outre pour rendre la solution plus conductrice on y ajoute une forte proportion d'acide sulfurique; le bain doit marquer environ 25° Beaumé. Dans la cuve A on place des vases poreux B, renfermant de l'eau acidulée d'acide sulfurique dans laquelle plonge une lame de zinc amalgamé,

à cette lame de zinc on suspend le moule à reproduire. Le dispositif constitue donc un élément Daniell dont les deux pôles sont réunis extérieurement par une tige métallique D sans résistance; presque toute l'énergie électrique est employée à la décomposition du sel métallique. On peut mettre dans la cuve autant de vases poreux que sa capacité le permet.

Ce système présente les inconvénients suivants :

Il ne peut s'appliquer à une grande production, parce que l'amalgamation du zinc, le renouvellement des acides demande beaucoup de main-d'œuvre; en outre, on est très limité dans l'intensité des courants que l'on peut employer. Le bain va toujours en s'enrichissant en acide sulfurique, celui-ci filtrant à travers le vase poreux, de sorte qu'au bout d'un certain temps on est obligé d'en renouveler la solution.

281. **Bains composés.** — Pour une production plus importante on place la source d'électricité en dehors du bain, on peut employer des piles ou des dynamos.

Il faut faire usage des piles présentant une faible force électromotrice, une faible résistance intérieure et à dépolarisation rapide, le courant fourni devant avoir une intensité considérable.

Pour un moule d'une surface déterminée, le poids du cuivre déposé étant proportionnel à l'intensité du courant, on arrivera d'autant plus vite à obtenir un dépôt d'épaisseur convenable que le courant sera plus intense, mais plus le dépôt se fait lentement et plus le cuivre est homogène et tenace, un dépôt rapide est grenu et manque de cohésion. *Pour obtenir un bon dépôt, il ne faut jamais dépasser comme densité de courant 3 ampères par décimètre carré de surface de moule.*

Dans le cas de bains composés, c'est-à-dire lorsque la source d'électricité est extérieure, on peut faire usage d'*anodes insolubles en charbon de cornue ou d'anodes solubles en cuivre*. Avec les premières il faut maintenir le bain saturé au moyen de sulfate de cuivre, tandis qu'avec les secondes la concentration reste toujours la même puisqu'il se dissout autant de métal qu'il s'en est déposé. Les anodes en charbon présentent en outre l'inconvénient d'apporter dans le bain toutes les impuretés qu'elles renferment. On doit toujours préférer les anodes en tôle de cuivre, et surtout celles raffinées elles-mêmes par la voie électrolytique.

Lorsqu'on fait usage d'anodes solubles, le bain doit avoir la composition suivante (Fontaine) :

Sulfate de cuivre 825 grammes.
Acide sulfurique 825 —
Eau distillée 10 litres.

Le bain marque 25° au pèse acide Baumé.

Dans les ateliers où la production est suffisamment importante, l'emploi des machines dynamo électriques doit être recommandé pour la production de l'électricité.

Elles présentent en effet des avantages considérables sur les piles, elles prennent peu de place, sont faciles à régler, donnent un courant toujours constant et que l'on peut amener facilement à l'intensité désirée, tandis que les piles deviennent rapidement encombrantes quand il s'agit de courants d'intensité considérable, leur force électromotrice va toujours en diminuant à partir du moment où l'on a renouvelé les acides, elles consomment du zinc, du mercure pour l'amalgamation, de l'acide sulfurique et exigent beaucoup de main-d'œuvre d'entretien. Le seul reproche que l'on puisse faire aux machines

dynamo, c'est que en général les ateliers ne travaillant que 10 à 12 heures au maximum par jour, le dépôt ne se fait pas la nuit; cet inconvénient est largement compensé par les autres avantages.

La figure 252 donne la disposition schématique d'une

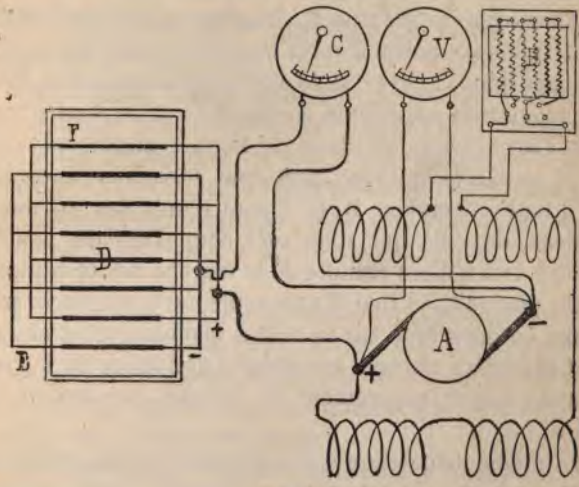


Fig. 186.

installation pour la reproduction de planches d'impression qui nous a donné d'excellents résultats.

A est une dynamo excitée en dérivation pouvant débiter 250 ampères avec une force électromotrice qui peut s'élever jusqu'à 2,5 volts.

Un rhéostat B sert à faire varier la résistance et par conséquent l'intensité du champ magnétique de façon à régler la force électromotrice d'après le débit; V est un voltmètre donnant la force électromotrice aux bornes de la

dynamo ; l'ampèremètre C intercalé sur le circuit indique à chaque instant l'intensité du courant. Au-dessus de la cuve D, sont placées deux grilles formées de barres de cuivre rouge, l'une E réunie au pôle positif de la dynamo à laquelle on suspend les anodes en cuivre électrolytique, l'autre F qui sert à supporter les empreintes.

Au moyen du rhéostat B, le galvanoplaste peut régler l'intensité du courant d'après la surface totale des moules plongés dans la cuve ; si le voltmètre indique une force électromotrice supérieure à celle qui est nécessaire lorsque l'installation est dans de bonnes conditions, c'est qu'il se trouve quelque part une résistance anormale qu'il faut rechercher. B, C, V sont réunis sur un même tableau, de sorte que d'un seul coup d'œil on peut se rendre exactement compte de la marche des opérations.

On pourrait, au lieu d'une seule cuve, en placer plusieurs en dérivation sur la même machine, mais alors il faut placer un rhéostat sur chaque dérivation de façon à pouvoir régler séparément la marche de chacun des bains.

La même disposition est employée pour le nickelage, sauf que la dynamo peut donner jusqu'à 5 volts de force électromotrice. Cette disposition peut s'adapter pour toutes espèces de dépôts métalliques.

Comme un courant de 1 ampère met en liberté 1 gr. 18 de cuivre par heure, l'installation que nous venons de décrire peut déposer en 10 heures :

$$1{,}18 \times 10 \times 250 = 2{,}950 \text{ gr. de cuivre.}$$

En admettant une densité de courant de 2 ampères par décimètre carré, ce qui donne du cuivre très résistant, on peut mettre à la fois dans le bain $\frac{250}{2} = 125$ déci-

mètres carrés soit 1,25 mètre carré d'empreintes. En dix heures de travail, elles auront acquis une épaisseur 0,26 millim. Si l'on voulait employer une densité de courant de 3 ampères par décimètre carré on ne pourrait mettre à la fois dans le bain que $\frac{250}{2} = 83$ décimètres carrés de moules. Mais l'épaisseur à la fin de la journée serait de 0,4 millimètres.

282. **Cuivrage d'objets métalliques.** — Lorsque les objets sur lesquels le cuivre doit être déposé sont attaquables par l'acide sulfurique, il faut avoir recours à des sels à acide faible, on fait généralement usage du cyanure mais ce procédé ne s'applique qu'à des objets de petites dimensions parce que le cyanure de cuivre est un produit assez cher.

Les objets de grandes dimensions, comme les statues, candélabres, etc., en fonte de fer, sont d'abord enduits d'une peinture épaisse contenant de la poudre de cuivre qui la rend conductrice; la fonte est ainsi préservée de l'action de l'acide sulfurique.

283. **Laitonisage.** — La galvanoplastie permet de déposer non seulement du cuivre pur, mais encore du laiton, alliage de cuivre et de zinc ou du bronze, alliage de cuivre et d'étain. Pour arriver à ce but on emploie des bains composés d'un mélange dans des proportions convenables des sels des métaux à déposer (1).

284. **Nickelage.** — Le bain qui nous a toujours donné les meilleurs résultats pour cette opération est formé d'une dissolution de sulfate double de nickel et d'ammoniaque marquant 7° à l'aréomètre de Baumé, cette solu-

(1) Voir *Électrolyse*, renseignements pratiques, par M. Hippolyte Fontaine.

tion est rendue très légèrement acide par de l'acide citrique ou tartrique. Un bain alcalin donne un dépôt de nickel gris contenant de l'oxyde ; quand il est trop acide le dépôt n'est pas adhérent.

La décomposition du sulfate double de nickel et d'ammoniaque demande une force électromotrice plus élevée que celle du sulfate de cuivre, en outre la résistance électrique du bain est plus grande de sorte que la source d'électricité doit produire une tension plus élevée que pour le cuivre.

Pour les petits bains il faut employer deux éléments Bunzen en tension ; quand on se sert d'une machine dynamo-électrique il faut que celle-ci puisse donner 5 volts aux bornes.

285. **Autres dépôts métalliques.** — L'argent se précipite d'une solution de nitrate ou de cyanure ; pour la dorure on emploie une solution de cyanure double d'or et de potassium.

La description détaillée des méthodes employées pour les dépôts métalliques nous entraînerait de beaucoup en dehors de notre cadre, aussi nous sommes obligé de renvoyer aux traités spéciaux sur la matière.

286. **Accumulateurs.** — *Principe. Pile à gaz.* — Reprenons l'expérience (119. fig. 95) par laquelle nous avons montré à quelle cause il faut attribuer l'effet connu sous le nom de *polarisation des piles hydro-électriques ;* nous avons vu que si nous décomposons de l'eau dans un voltamètre dont les électrodes sont formées par des lames de platine ou de plomb et si ensuite nous enlevons la pile et si nous réunissons l'anode et la cathode par l'intermédiaire d'un galvanomètre, nous constaterons le passage d'un courant de sens contraire à celui qui a

déterminé la décomposition, c'est-à-dire que le voltamètre se comportera comme une pile électrique l'anode formant le pôle positif, la cathode le pôle négatif. Le courant durera tant que la recomposition des gaz sera effectuée.

L'appareil que nous venons de décrire constitue *la pile à gaz de Grove.*

Quand dans un voltamètre à eau acidulée (fig. 250) on place deux électrodes en plomb bien décapées et que l'on fait passer un courant suffisant pour opérer la décomposition de l'eau, on observe les phénomènes suivants : l'oxygène, se portant sur l'électrode positive, l'oxyde et il se forme à la surface une couche brune de peroxyde de plomb (PbO^2) qui reste adhérente à la surface parce qu'elle est insoluble dans l'acide sulfurique étendu ; l'hydrogène qui se porte sur l'électrode négative réduit à l'état métallique toutes les traces d'oxyde qui s'y trouvent et la lame de plomb passe du gris blanchâtre à une teinte grise beaucoup plus claire et plus brillante.

Au bout d'un certain temps, si l'on enlève la pile et si l'on ferme le circuit du voltamètre sur une résistance extérieure, le peroxyde de plomb qui recouvre la lame positive décompose l'eau pour s'emparer de son hydrogène tandis que l'oxygène en excès se porte sur la lame négative et l'oxyde, les réactions qui se passent peuvent être indiquées par les formules suivantes :

1° Pendant la décomposition sous l'influence du courant :

$$PbO + H^2O + PbO = PbO^2 + H^2O + Pb$$

2° Le voltamètre agissant comme pile :

$$PbO^2 + H^2O + Pb = PbO + H^2O + PbO$$

Au bout d'un certain temps les deux électrodes sont donc toutes les deux recouvertes d'une couche d'oxyde de plomb.

Si l'on fait de nouveau passer le courant dans le même sens que primitivement, la plaque positive passera de nouveau au maximum d'oxydation, tandis que l'oxyde de la plaque négative, sera réduit à l'état de plomb métallique spongieux et absorbera l'hydrogène qui vient se dégager sur la cathode; lorsque tout l'oxyde de la plaque négative sera réduit l'hydrogène se dégagera à l'état gazeux.

A ce moment, nous pourrons nous servir de nouveau de notre appareil comme d'une source d'électricité, c'est ce qui a fait donner le nom *de pile secondaire*.

On doit à Planté (1) l'application des propriétés des électrodes en plomb, pour la création des piles secondaires.

287. **Différence entre les condensateurs et les piles secondaires.** — Dans une pile secondaire on transforme d'abord l'énergie électrique en énergie chimique, on emmagasine cette énergie chimique et l'on peut ensuite dépenser au fur et à mesure des besoins sous la forme d'énergie électrique cette énergie chimique *accumulée*, de là vient le nom d'*accumulateur* donné aux piles secondaires. Dans un condensateur, au contraire, l'énergie électrique est emmagasinée directement sans aucune transformation.

A première vue, l'emploi des condensateurs paraît préférable puisqu'il évite les pertes provenant de transformations multiples, mais tandis que pratiquement un accumulateur pesant 1 kilogramme peut emmagasiner

(1) Voir les *Recherches sur l'électricité*, par Gaston Planté, 1879.

15 à 20,000 Coulombs sous une tension de 2 volts, sous la même différence de potentiel, la charge de la sphère terrestre ne serait que de 2 Coulombs.

On peut voir par là que l'emploi des condensateurs est absolument impratiquable lorsqu'il s'agit d'accumuler des charges considérables.

288. **Formations des accumulateurs.** — En examinant la suite des opérations exposées plus haut (286) on peut voir que la quantité d'énergie emmagasinée est d'autant plus considérable que la couche d'oxyde et de plomb réduit qui se trouve à la surface des électrodes est elle-même plus grande ; en outre on peut voir qu'à chaque opération la couche d'oxyde ou de plomb spongieux devient plus épaisse. Lorsque l'on construit un accumulateur, il faut d'abord le soumettre à des charges et à des décharges successives pour arriver à la capacité voulue, c'est ce que M. Planté a appelé la *formation des accumulateurs*.

Lorsqu'il s'agit de batteries importantes cette opération est longue et coûteuse, elle se pratique dans les ateliers de fabrication en chargeant les accumulateurs au moyen de dynamos et en les déchargeant sur des résistances.

289. **Accumulateur Faure.** — Dans le but de supprimer l'opération de la formation, M. Faure a repris une idée qui avait déjà été émise par Planté, il recouvre les électrodes d'une couche d'oxyde de plomb. On enduit la plaque positive de minium (Pb^5O^4 ou $2PbO.PbO^2$) et l'électrode négative de litharge (PbO). La charge a pour effet de transformer le minimum en peroxyde de plomb par suite de l'addition d'oxygène ($Pb^3O^4 + O^2 = 3PbO^2$), on voit passer le minium de la teinte rouge bien

connue au brun foncé qui est la couleur du peroxyde, tandis que la cathode est réduite à l'état de plomb métallique spongieux gris clair.

Dans les accumulateurs du type Faure, la formation n'est pas complètement supprimée mais sa durée est considérablement réduite.

On a rencontré de grandes difficultés pour arriver à faire adhérer convenablement la couche d'oxyde sur le plomb métallique. On y est arrivé en formant le squelette de la plaque d'une grille en plomb (fig. 253) sur laquelle on étend l'oxyde dont on a fait une pâte ferme en y ajoutant de l'acide sulfurique. On a donné aux supports une infinité de formes pour arriver à avoir des plaques durables, mais le succès dépend surtout des soins apportés dans la construction et dans la conduite des appareils.

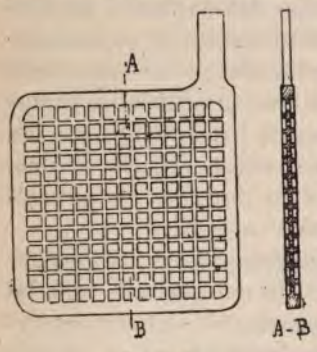


Fig. 253.

Lorsque les squelettes des plaques sont en plomb pur, ils interviennent comme matière active, de sorte qu'après un temps de service plus ou moins long, on n'a plus d'une part que de l'oxyde et d'autre part du plomb spongieux ; arrivées à cet état les plaques ont perdu leur solidité et tombent rapidement en ruine. Pour éviter cet inconvénient on fabrique les grilles supportant l'oxyde en un alliage de plomb, d'antimoine et de mercure qui ne prend pas de part à l'action chimique (Electrical Power Storage Cy, l'Élec-

trique, accumulateurs système Julien à Bruxelles ; Huber, à Hambourg) ; seulement pour un poids donné de batterie, la quantité de matière active est moins grande que dans les autres ; mais cet inconvénient a peu d'importance dans les installations fixes.

Les plaques alternativement + et — montées parallèlement, sont réunies en un certain nombre dans un même récipient. Toutes les électrodes positives et toutes les négatives sont réunies en quantité ; elles sont isolées l'une de l'autre par du caoutchouc ou par des bandes de verre.

On emploie des récipients en ébonite, en verre, ou en bois doublé de plomb. Chacune de ces substances présente ses avantages et ses inconvénients ; l'ébonite convient très bien mais elle coûte cher, de sorte que l'on est tenté d'en réduire l'épaisseur.

Le verre est fragile, mais il convient cependant très bien dans les installations fixes ; il faut avoir bien soin que le poids des éléments soit bien réparti sur toute la base, sinon si la cuve reposait seulement par deux ou trois points elle finirait par se briser. Les bacs en bois doublé de plomb conviennent très bien, surtout pour les batteries qui doivent être transportées, à condition que les soudures soient faites exclusivement au plomb sans aucun alliage, sinon il se forme des couples locaux qui amènent la destruction rapide du métal.

Les plaques doivent être complètement recouvertes d'eau distillée additionnée d'acide sulfurique, jusqu'à ce que la densité soit de 1.170.

Toutes les connexions entre les plaques doivent être faites en plomb ou en alliage inoxydable, à l'exclusion du cuivre et du laiton qui sont rapidement détruits par l'acide sulfurique.

Pendant la décharge la richesse du liquide en acide sulfurique diminue et sa densité tombe à 1.130, tandis que pendant la charge la quantité d'acide sulfurique augmente et la densité s'élève jusqu'à 1.210, ce qui tendrait à prouver que pendant la décharge, l'acide sulfurique se combine à l'oxyde de plomb pour former du sulfate qui est décomposé pendant la charge (1).

290. **Force électromotrice et résistance intérieure.** — Lorsque l'on charge un accumulateur sa force électromotrice monte très rapidement de 0 jusque près de deux volts, ensuite elle augmente lentement pendant toute la durée de la charge, jusqu'au moment où celle-ci est complète, ce que l'on peut constater par ce fait que les gaz venant d'être absorbés par les électrodes se dégagent sous la forme de bulles qui font mousser le liquide. Si l'on mesure la force électromotrice à circuit ouvert, quelques minutes après la rupture de circuit, de façon à laisser aux bulles de gaz le temps de s'échapper, on trouve 2,2 volts à 2,21 volts.

La résistance intérieure est extrêmement faible, cependant elle n'est pas absolument négligeable dans les applications; ainsi, pour la charge il faut compter non pas sur 2,21 volts par élément, mais en appelant r la résistance intérieure, et I l'intensité du courant, il faut que la source d'électricité puisse produire une force électromotrice $E = 2,21 \times rI$; en pratique on compte que la machine qui sert à charger des accumulateurs doit pouvoir développer une force électromotrice égale à autant de fois 2,5 volts qu'il y a d'éléments.

(1) Pour tout ce qui concerne l'entretien et la marche des accumulateurs nous ne pouvons mieux faire que de renvoyer au traité « Management of Accumulators, par Sir David Salomons. »

Pour mesurer la résistance intérieure on procède de la façon suivante : l'élément étant chargé, on mesure sa force électromotrice E à circuit ouvert, ensuite on ferme le circuit sur une résistance telle qu'il débite le courant pour lequel il est construit ; ainsi on fera travailler un accumulateur de 12 kilogrammes sur une résistance d'environ 0,17 d'ohm. Cette résistance que j'appellerai R étant préalablement mesurée, au moment de la fermeture du circuit, on note la force électromotrice E′ et l'intensité I du courant on a l'égalité.

$$E - E' = rI \quad \text{d'où} \quad r = \frac{E - E'}{I}$$

291. **Variation de force électromotrice pendant la décharge.** — Une batterie d'accumulateurs étant chargée, si l'on ferme le circuit extérieur par l'intermédiaire d'une résistance telle que l'intensité du courant ne dépasse pas celle que l'appareil peut fournir sans se détériorer trop rapidement, il y a d'abord, comme nous l'avons dit, une chute brusque de potentiel égale au produit de l'intensité du courant par la résistance intérieure ; ensuite la force électromotrice diminue lentement jusqu'à une certaine valeur qui est de 1,85 volt à circuit fermé. A partir de ce moment, si l'on continue la décharge, la chute de potentiel devient très rapide.

292. **Régime de charge et de décharge. — Durée des accumulateurs.** — Dans les accumulateurs du type Faure, c'est-à-dire à plaques garnies d'une couche d'oxyde artificiel, lorsque la charge ou la décharge se fait avec des courants trop intenses, le dégagement de gaz produit par les réactions chimiques se fait d'une façon tumultueuse, l'oxyde se boursouffle et se détache, les plaques se courbent et viennent en contact les unes avec les autres, ce qui pro-

duit des courts circuits à l'intérieur des éléments ; aussi, pour assurer une longue durée aux appareils, il importe surtout pour la charge, de ne pas dépasser un courant d'une intensité d'environ un ampère par kilogramme de plaques. Les accumulateurs du genre Planté, obtenus par formation directe de lames de plomb peuvent supporter sans détérioration des courants plus intenses.

Les plaques positives se gonflent par suite de la formation du peroxyde, leur usure est plus rapide que celle des électrodes négatives dont la durée peut être presqu'indéfinie si l'on ne dépasse pas la limite indiquée pour la charge et pour la décharge.

Quand on décharge les accumulateurs à fond, c'est-à-dire qu'on laisse descendre la force électromotrice en-dessous de 1,85 volt, à circuit fermé, la détérioration est également très rapide.

Il ne faut pas laisser évaporer le liquide des accumulateurs de façon qu'une partie des plaques vienne à découvert, parce qu'alors il se forme du sulfate de plomb blanc qui ne se réduit pas par le passage du courant ; cette matière est mauvaise conductrice de l'électricité, elle augmente donc la résistance intérieure et empêche les gaz de venir en contact avec la matière active.

293. **Capacité des accumulateurs. — Rendement.** — La quantité d'énergie qui peut être emmagasinée dans un accumulateur est proportionnelle à la quantité de matière active et par conséquent au poids des éléments.

Pratiquement on peut compter sur une capacité utile de 5 ampères-heures, soit $5 \times 3600 = 18000$ coulombs par kilogramme de plaques. Un élément du poids de 1 kilogramme pourra donc fournir un courant de 1 ampère pendant 5 heures, ou bien de 0,5 ampère pendant 10 heures.

Le rendement des accumulateurs est assez élevé lorsqu'ils sont bien conduits ;

1° Pendant la charge, les pertes proviennent des bulles de gaz qui s'échappent et surtout de la quantité d'énergie nécessaire pour fair circuler le courant à travers les accumulateurs.

Appelons E_o la force électromotrice à circuit ouvert au commencement de la charge, et E à la fin ; r la résistance intérieure ; et I l'intensité du courant de charge maintenue constante. La puissance en Watts-heures dépensée pendant la charge sera :

$$W = \left[\frac{E_o + E}{2} \times I + I^2 r\right] H$$

$\frac{E_o + E}{2}$ étant la force électromotrice moyenne, et H la durée de la charge en heures.

$I^2 r$ représente le travail perdu par unité de temps.

2° Pendant la décharge, le travail restitué par unité de temps sera de

$$W' = \left[\frac{E_o + E}{2} \times I' - I'^2 r\right] H'.$$

En supposant que l'on pousse la décharge jusqu'à ce que la force électromotrice soit revenue à sa valeur initiale.

Le rendement en Watts $= \frac{W'}{W}$

Le rendement en Ampères $= \frac{I'H'}{IH}$

Pratiquement on peut compter sur un rendement en *ampères-heures* de 90 p. 100 et sur 80 p. 100 pour le rendement en Watts-heures.

294. **Calcul d'une batterie d'accumulateurs.** — Déterminer le poids d'une batterie d'accumulateurs devant alimenter

30 lampes à incandescence de 60 watts (100 volts, 0.6 amp.) pendant 5 heures.

Nous admettrons un régime de 1 ampère par kilogr. pour la charge et pour la décharge.

Comme nous ne pouvons descendre que jusqu'à 1.85 volt pour la décharge il nous faudra accoupler $\frac{100}{1.85} = 54$ éléments en tension.

La batterie étant nouvellement chargée on peut compter sur une force électromotrice de 2 volts ; au commencement de la décharge nous ne devrons donc employer que 50 éléments, en garder 4 en réserve et les intercaler dans le circuit au fur et à mesure que la tension descend.

Nous devons avoir une capacité utile de $30 \times 0.6 \times 5 = 90$ amp. H. Chaque élément devra donc peser $90 = 18$ kilogr. et le *poids total de la batterie* sera de $18 \times 54 = 972$ kilogr.

En comptant sur un rendement en ampères-heures de 90 p. 100, la charge devra durer : 5 h. 34'. Soit 5 h. 3/4.

Pendant la charge, la force électromotrice, aux bornes de la batterie devra varier depuis : 100 volts $+ rI =$ 101 volts environ jusqu'à $\frac{54 \times 2,20}{E} + rI = 2^{v}.5 \times 54$ $= 135$ volts.

295. **Conduite d'une batterie d'accumulateurs.** — Il ne peut être question de charger une batterie d'accumulateurs de quelqu'importance, au moyen de piles primaires; le seul procédé pratique industriel consiste à employer une machine dynamo-électrique. Cette machine doit répondre aux conditions suivantes :

1° Elle doit pouvoir fournir une force électromotrice plus grande que celle de la batterie à charger.

2° Comme pendant le chargement l'intensité du courant doit être maintenue constante, il faut que la force électromotrice de la source puisse varier avec celle des accumulateurs.

Il résulte de là que ni les dynamos en série ni les dynamos Compound ne peuvent convenir pour le chargement des batteries; supposons pour un instant que l'on emploie une dynamo en série comme appareil de chargement, l'augmentation de force électromotrice de la batterie tend toujours à diminuer l'intensité du courant; il en résulte que la tension aux bornes de la dynamo diminue au fur et à mesure que la charge augmente alors que le contraire devrait se produire; lorsque la force électromotrice de la dynamo et celle de la batterie sont voisines l'une de l'autre, il suffit d'un petit ralentissement du moteur pour que la seconde l'emporte sur la première, et par conséquent pour que la batterie se décharge à travers la machine et renverse la polarité du champ magnétique de celle-ci; la batterie continuera à se décharger, même si l'on rétablit une vitesse convenable.

Les machines Compound, qui sont construites pour donner une tension constante quelle que soit l'intensité du courant, ne peuvent pas non plus convenir puisque le chargement des piles secondaires demande une tension variable; en outre comme ces dynamos participent des propriétés des machines en série, elles sont également sujettes à des changements de polarités, car le courant s'établit bien plus facilement dans le gros fil en série que dans le fil fin des électros, qui présente une résistance beaucoup plus grande.

Les seules dynamos qui conviennent pour le service des accumulateurs sont celles excitées en dérivation, dont la force électromotrice a une tendance à s'élever au fur et à mesure que l'intensité du courant extérieur diminue. En outre l'examen de la marche du courant dans le champ magnétique montre que la polarité des électro-aimants ne change pas de sens en cas de renversement du courant extérieur.

Pour éviter le retour du courant vers la machine lorsque par une suite d'une cause quelconque la force électromotrice de celle-ci vient à tomber en-dessous de celle des accumulateurs, on intercale une électro-aimant dans le circuit de chargement (fig. 254); dès que le courant passe par zéro, ce qui a lieu soit lorsque le moteur s'arrête, soit quand la tension fournie par la dynamo, est égale à la force contre électromotrice de la batterie, l'armature de l'électro n'étant plus retenue, bascule en B et le courant est coupé en CD. On doit le rétablir à la main dès que la force électromotrice à la dynamo est ramenée à une valeur suffisante.

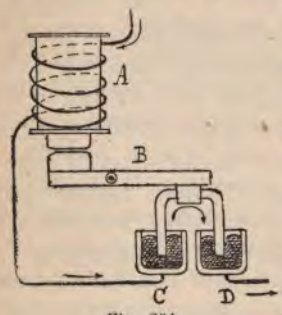


Fig. 254.

Lorsque l'on arrive à la fin de la charge il est bon de diminuer graduellement l'intensité du courant parce que à ce moment il n'y a plus autant de matière active qui entre en réaction et les éléments seraient sujets à *bouillir* avant que la charge fût absolument complète.

Pour s'assurer que tous les éléments d'une batterie se

chargent bien régulièrement, il ne faut pas comme on le fait souvent, provoquer des étincelles en réunissant les deux pôles par un fil de cuivre, cette pratique est préjudiciable à la bonne conservation des éléments ; le meilleur moyen consiste à faire usage d'un pèse-acide que l'on place dans les boîtes, il faut que l'acide ait la même densité dans tous éléments.

Pendant la décharge il faut veiller à ce que la force électromotrice de la batterie ne descende pas en-dessous de 1.85 volt par élément; pour cela nous avons dit que l'on conservait 3 ou 4 éléments en réserve, que l'on ajoute au fur et à mesure des besoins; il ne serait pas utile d'en ajouter un plus grand nombre, parce que à partir du moment où la tension est descendue au-dessous de 1.85 volts par élément, l'adjonction d'élément frais ne compenserait pas la diminution rapide résultant des éléments épuisés.

La figure 255 représente schématiquement la disposition du commutateur d'adjonction, on remarquera qu'entre les blocs *a-b*, *a'-b'* on a disposé des résistances de telle façon que les éléments ne soient jamais en court circuit, même pendant le petit instant nécessaire pour déplacer la manette du commutateur de *a* en *a'*, quand celle-ci est dans la position où elle touche à la fois *a'* et *b* la résistance *a'b'* est intercalée entre les deux pôles de l'élément 2.

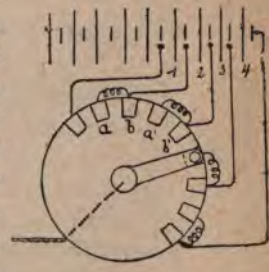


Fig. 255.

Lorsque le niveau du liquide baisse dans les éléments, il faut simplement y ajouter de l'eau distillée

de façon que les plaques soient entièrement recouvertes.

Si la batterie doit être abandonnée à elle-même pendant assez longtemps, il faut la charger bien à fond et lui donner de temps en temps une légère charge.

CHAPITRE XXI

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

296. **Reversibilité des machines dynamo-électriques.** — Nous avons vu au chapitre, de l'induction que quand on fait mouvoir un conducteur dans un champ magnétique, ce conducteur devient le siège d'un courant dont le sens est tel que son action sur le champ inducteur tend à s'opposer au mouvement.

Ce phénomène est réversible, c'est-à-dire que si nous envoyons dans le conducteur qui peut se déplacer dans le champ magnétique un courant provenant d'une source extérieure, le conducteur se mettra en mouvement par suite de l'action qui s'exerce entre les lignes de force du champ fixe et celles créées autour du conducteur par le passage du courant.

Ainsi, si nous envoyons un courant continu dans une machine dynamo-électrique excitée en série, l'induit de celle-ci se mettra à tourner et si l'on crée une résistance sur la poulie, cette résistance pourra être vaincue si l'intensité du courant est suffisante. La dynamo pourra alors servir comme moteur et être employée à mettre en mouvement des machines-outils, des treuils, etc.

Le sens de rotation de l'induit d'un moteur électrique en série est indépendant du sens du courant dans le circuit ; en effet la rotation provenant de l'action du champ magnétique fixe sur le champ magnétique de l'induit, et

[illegible]

[illegible] deux champs magnétiques changées [illegible]
[illegible] direction du mouvement [illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible] dans les [illegible]

2° **Déplacement des balais des moteurs [illegible]**

— [illegible]
[illegible] dans les machines [illegible]
[illegible] ligne [illegible]
[illegible] déplacement [illegible]
par affaiblissement du champ magnétique [illegible]
qui détermine l'aimantation de l'induit, [illegible]
force [illegible] comme l'indique la fig. [illegible]
Quand la machine agit comme moteur [illegible]

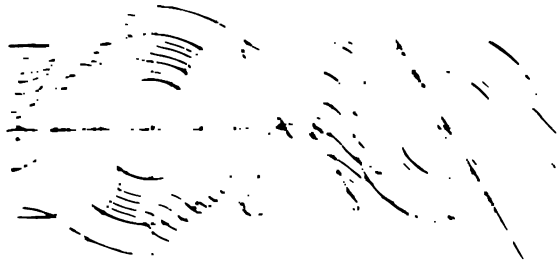


Fig. 256 Fig. [illegible]

les deux champs magnétiques s'ajoutent, la ligne [illegible]
au lieu de se déplacer dans le sens du mouvement, [illegible]
la position S'N' (fig. 257). Les balais de[illegible]
déplacés d'un certain angle dans le sen[illegible]
vement.

298. **Rendement des moteurs électriques.** [illegible]
ne machine dynamo-génératrice, soi[illegible]

dans le circuit qui les réunit, intercalons un ampèremètre G.

Mettons A en mouvement en augmentant graduelle-

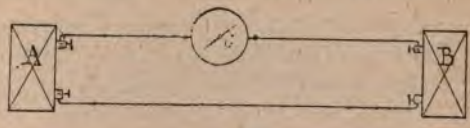


Fig. 258.

ment sa vitesse, le galvanomètre G accusera un courant d'intensité I croissante ; lorsquel I aura acquis une certaine valeur, la réaction du champ magnétique de B sur son induit sera suffisante pour vaincre les résistances des frottements de cette machine et l'anneau se mettra en mouvement.

Pour une vitesse donnée de la génératrice A, il se produira pour la réceptrice une vitesse de régime telle que le travail des frottements dans B, (frottements de l'axe sur ses coussinets et des outils à mettre en mouvement, par exemple), plus le travail électrique absorbé par l'échauffement déterminé dans les machines A et B et dans le circuit qui les réunit est égal au travail moteur fourni à la génératrice.

En laissant tout le système dans les mêmes conditions, si on fournit à A un travail moteur plus considérable, sa vitesse va s'accélérer, sa force électromotrice va augmenter et par conséquent l'intensité du courant augmentera également.

Mais la machine réceptrice B produit-elle aussi une force électromotrice qui est de sens contraire à celle de A, puisqu'elle tourne en sens inverse, la force contre élec-

ces deux champs magnétiques changeant tous les deux de direction, la direction du mouvement reste toujours la même. Pour arriver à renverser la marche, il faut donc changer le sens du courant dans l'induit tout en le maintenant le même dans les inducteurs.

297. **Déplacement des balais des moteurs à courants continus.** — Nous avons vu que pour éviter les étincelles au collecteur, on est obligé dans les machines à courant continu, de déplacer la ligne de contact des balais dans le sens de la rotation; ce déplacement est rendu nécessaire par l'affaiblissement du champ magnétique inducteur que détermine l'aimantation de l'induit, les lignes de force sont déformées comme l'indique la fig. 256.

Quand la machine agit comme moteur, au contraire,

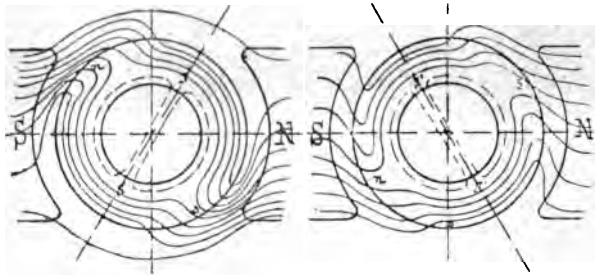


Fig. 256. Fig. 257.

les deux champs magnétiques s'ajoutent, la ligne neutre au lieu de se déplacer dans le sens du mouvement, prend la position S'N' (fig. 257). Les balais doivent donc être déplacés d'un certain angle dans le sens opposé au mouvement.

298. **Rendement des moteurs électriques.** — Soit A (fig. 258), une machine dynamo-génératrice, soit B la réceptrice;

I^2R étant le travail calorifique développé dans le circuit, et W le travail mécanique rendu par la réceptrice. Or celle-ci développant une force électromotrice e de sens contraire à E.

$$w = e\,I.$$

D'après la loi d'Ohm, l'intensité I du courant qui parcourt tout le système est égale à :

$$I = \frac{E - e}{R}$$

L'équation (1) nous donne :

$$w = EI - I^2R \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

le rendement du transport est donc :

$$\frac{w}{W} = \frac{E\,I - I^2R}{E\,I} = I - \frac{I\,R}{E}$$

Ce rendement sera maximum pour une valeur donnée de E et de R, lorsque $\frac{I\,R}{E}$ sera le plus petit possible.

Cette quantité sera la plus petite possible pour $I = 0$, mais alors $W = 0$ et $w = 0$, donc cette solution doit être écartée.

L'équation (2) montre que la plus grande valeur de w s'obtiendra pour $I = \frac{E}{2\,R}$ (2) ; donc, lorsque la réceptrice fonctionnera dans des conditions telles que sa force électromotrice tendra à réduire de moitié l'intensité du courant que produirait la génératrice si la seconde machine était en repos, le rendement $\frac{w}{W}$ deviendra égal à 1/2. (Mascart, *Journal de Physique*, 1877).

Cela veut-il dire que le maximum du rendement qu'on puisse obtenir est égal à 50 p. 100?

Nullement, ainsi que nous allons le montrer.

Il y a lieu de ne pas confondre le rendement maximum que l'on peut obtenir dans des circonstances données, avec les conditions les plus avantageuses de la marche d'une machine.

Quelque chose d'analogue se présente dans les machines à vapeur. La plus grande somme de travail que puisse fournir une machine est donnée, lorsque celle-ci fonctionne à pleine admission, mais tout le monde sait que ce ne sont pas là les conditions de marche les plus économiques.

La chaleur de la vapeur est utilisée beaucoup plus complètement quand on travaille à détente, mais alors pour une même pression initiale et un cylindre de mêmes dimensions, le travail par course est moins élevé.

Pour les machines électriques, on peut montrer très clairement la chose par le tracé graphique suivant, dû à M. le professeur S. P. Thompson.

299. — Nous avons dit que nous conservions E et R constantes : la force contre-électromotrice de la réceptrice est représentée par e : nous avons :

$$W = E\,I = \frac{E\,(E - e)}{R} \qquad w = e\,I = \frac{e\,(E - e)}{R}$$

R étant constant, W et w sont proportionnels respectivement à :

$$E\,(E - e) \text{ et } e\,(E - e)$$

Traçons (fig. 259) un carré ayant comme côté une longueur proportionnelle à E. Portons AF et AH proportionnelles à e, et traçons F'G et HK.

Le travail dépensé $W = E\,\frac{(E - e)}{R}$ est représenté par l'aire du rectangle BDFG ; le travail récupéré w est proportionnel à l'aire de LGHC.

Il est clair que l'aire w sera maximum lorsque le point L sera au milieu de la diagonale AD ; le travail W sera alors

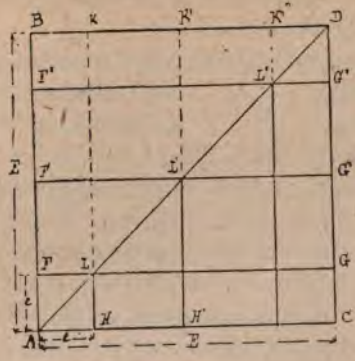


Fig. 259.

représenté par BDF'G', et le travail utile par L'G'H'C. C'est dans ces conditions que la réceptrice rend la plus grande somme de travail qu'elle puisse donner; elle est complètement utilisée.

Mais si nous exigeons d'elle moins de travail, si, comme dans l'expérience que nous citions tout à l'heure, nous diminuons la charge du frein, la vitesse va augmenter, e va augmenter et prendra par exemple la valeur AF''. Le travail utile se rapprochera de plus en plus du travail fourni, et le rendement augmentera. On voit également, comme nous le disions plus haut, que le travail par tour à fournir à la génératrice devient de plus en plus petit. Et comme le disait M. Bertrand à l'Académie des sciences, à la limite, on transmet O, on reçoit O, le rendement est 100 p. 100.

300. **Influence de la résistance du circuit sur le rendement.** —

Le travail W fourni à la génératrice, ainsi que nous l'avons dit, peut se décomposer en trois parties : le travail w rendu par la réceptrice, et le travail I^2R perdu par l'échauffement du circuit.

Appelons Rg la résistance de la génératrice.

Rm » » réceptrice.

R_l » du conducteur qui les réunit.

$I^2R = I^2 (Rg + Rm + Rl)$.

Généralement, lorsque le moteur est placé à une grande distance de la génératrice I^2R', est l'élément le plus important à considérer, mais on peut toujours le réduire autant qu'on le veut, il suffit de rendre la résistance faible en employant un conducteur en cuivre de diamètre suffisant. Cette solution n'est pas toujours pratique parce que l'on pourrait être conduit à une dépense exagérée d'installation ; on tourne la difficulté en employant des tensions élevées ainsi que nous le verrons au chapitre suivant.

En employant des machines à haute tension et suffisamment grandes, on peut arriver à établir une transmission de l'énergie par l'électricité avec un rendement aussi élevé qu'on le veut.

Voici les résultats d'essais faits par MM. Amsler de Schaffhausen, prof. Weber de Zürich, prof. Hagenbach-Bischoff de Bâle, prof. Veith de Zürich, Keller, ingénieur à Zürich, Lang, industriel à Derendigen (Suisse) et Bügin de Bâle sur une transmission électrique d'énergie établie de Kriegsheten à Solothurn par M. Brown ; dans la première de ces deux localités se trouve une dynamo mise en mouvement par une turbine d'une puissance de 40 chevaux. La réceptrice se trouve à 8 kilomètres de la la première.

Force électromotrice fournie par la génératrice	1231.6 Volts.
Force électromotrice fournie par la réceptrice	988.6 »
Courant mesuré au départ . . .	14.20 Ampères.
» » à l'arrivée . . .	14.17 (1).
Résistance de la génératrice . . .	3.741 Ohms.
» » réceptrice . . .	3.716 »
» de la ligne	9.228 »
Perte en volts le long de la ligne . .	136.5 Volts.
Puissance électrique totale de la génératrice	23.76 chevaux.
Puissance électrique totale de la réceptrice	19.03 »
Puissance électrique aux bornes de la génératrice	22.72 »
Puissance électrique aux bornes de la réceptrice.	22.02 »
Puissance fournie réellement à la génératrice	26.15 chevaux.
Puissance reçue de la réceptrice. .	17,85 »
Rendement de la génératrice. . .	90.8 p. 100
» » réceptrice . . .	93.7 p. 100
Rendement commercial de la génératrice	86.8 »
Rendement commercial de la réceptrice	89.1 »
Rendement commercial de la transmission	**68.3** »

On peut pratiquement établir des transports d'énergie électrique à distance dont le rendement commercial atteint 75 p. 100.

(1) La perte par dérivation était donc pratiquement nulle.

CHAPITRE XXII

TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. TRANSFORMATEURS

302. **Transport de l'énergie électrique.** — Le problème se présente généralement de la façon suivante, de l'énergie électrique étant développée en un point déterminé, il s'agit de la distribuer entre différents appareils plus ou moins éloignés de la source, appareils dans lesquels on transforme suivant les besoins cette énergie électrique en lumière, énergie mécanique ou énergie chimique (galvanoplastie, accumulateurs). Les points de consommation étant toujours plus ou moins éloignés du centre de production, le transport s'effectue au moyen de conducteurs qui s'échauffent sous l'influence du passage du courant, la chaleur produite se perd par rayonnement, de là résulte une perte que la loi de Joule (82) nous permet d'évaluer. I étant l'intensité du courant et R la résistance des conducteurs, cette perte est égale à I^2R ou bien encore si e est la force électromotrice nécessaire pour faire circuler le courant d'intensité I à travers la résistance R, la perte est égale à e I Joules par unité de temps.

Il s'agit d'établir le conducteur de façon que la perte soit la plus petite possible.

Il y a deux éléments à considérer, le produit I'R peut être rendu aussi petit qu'on le veut, il suffit pour cela de

rendre R petit en employant un conducteur très peu résistant, on est alors conduit à employer des câbles en cuivre de très fortes dimensions. Mais plus R sera petit plus les frais d'établissement seront considérables, nous avons donc d'une part à considérer les *frais de première installation* et d'autre part la perte de *travail provenant de la résistance du conducteur*.

303. **Règle de William Thomson.** — Les frais d'exploitation de l'installation seront les plus faibles possibles lorsque la somme qui représente annuellement l'intérêt et l'amortissement des frais de premier établissement, augmentés de la valeur en argent du travail perdu dans la ligne sera minimum.

Il s'agit de trouver la résistance R à donner au conducteur pour arriver à ce résultat.

Soit l la longueur de la ligne, R sa résistance, q sa section et s sa résistance spécifique, nous avons :

$$R = \frac{sl}{q}$$

Si l'intensité du courant est I, la perte d'énergie par centimètre de longueur est de $\frac{I^2.s}{q}$

Appelons p la fraction du temps pendant laquelle l'installation fonctionne annuellement, comme il y a $31,5 \times 10^6$ secondes dans une année, la perte d'énergie annuelle sera de

$$\frac{31,5 \times 10^6 \times p \times s \times I^2}{q} \text{ Watts.}$$

Comme un cheval vapeur équivaut à 736 Watts, si a est le prix annuel du cheval vapeur, la perte d'énergie

par centimètre de conducteur donnera lieu à une dépense annuelle de :

$$\frac{31,5 \times 10^6 \times p.s.\ I^2}{736}.\ a \text{ francs.}$$

Si P est le prix du centimètre cube de cuivre, en adaptant un intérêt annuel de 5 p. 100, chaque centimètre de conducteur donne lieu à un intérêt annuel de $\frac{Pq}{20}$ de sorte que la dépense totale est de :

$$\frac{31,5 \times 10^9 \times p.s.\ I^2}{736}.\ a \times \frac{Pq}{20} = S.$$

Il est facile de voir que la somme S sera minimum lorsque ses deux termes seront égaux, de là on tire :

$$q = I \sqrt{\frac{855 \times 10^5.\ p.s.\ a}{P}}$$

Telle est la *formule de Thomson* qui permet de calculer la section à donner au conducteur connaissant l'intensité du courant à transmettre.

Seulement cette formule n'est pas applicable dans tous les cas, souvent on a à résoudre autrement la question ; généralement on dispose d'une quantité *limitée* d'énergie dont l'on doit transporter la plus grande fraction possible, on ne peut plus alors s'astreindre à donner au conducteur la section donnée par la formule de Thomson parce que la perte serait beaucoup trop grande.

304. **Influence de la tension.** — Supposons que l'on ait à transporter une puissance de 100,000 Watts à 500 mètres de distance et que l'on admette une perte de 10 p. 100 dans la ligne.

Nous pouvons transmettre la puissance en question en établissant entre les extrémités du conducteur une

différence de potentiel de 100 volts, l'intensité du courant sera alors de 1000 ampères la perte dans le conducteur sera $I^2R = 10000$ et $R = \frac{1000}{106} = 0{,}01$ d'ohm.

La longueur totale étant de 1000 mètres, le diamètre sera de 46 millimètres et son poids de 148,016 kilogs.

On pourrait transmettre la même puissance avec la même perte en employant une tension de 1000 volts, l'intensité ne sera plus que de 100 ampères et la résistance pourra être de 1 ohm, le diamètre sera de 4,5 millimètres et le poids d'environ 148 kilogs.

Cet exemple montre clairement quel immense avantage les hautes tensions présentent au point de vue des dépenses de premier établissement.

305. **Inconvénients des hautes tensions.** — Les pertes le long des lignes parcourues par des courants de haute tension sont plus difficiles à éviter, cependant on parvient sans trop de difficultés à isoler convenablement les conducteurs.

L'argument le plus important contre l'emploi des hautes tensions, se trouve dans le danger qu'ils présentent pour la vie des personnes. On est loin d'être d'accord sur les conditions que doit remplir un courant pour devenir dangereux, il est probable que des effets des courants électriques diffèrent d'un individu à un autre et d'après les conditions d'isolation dans lesquels se trouve la personne exposée. Il y a cependant une chose certaine, c'est que les courants alternatifs sont beaucoup plus pernicieux que les courants continus; les effets des extra-courants sont surtout foudroyants.

En tous cas on ne peut pas penser à introduire dans des habitations des conducteurs entre lesquels il existe

une différence de potentiel de 1000 volts même permanente.

Aussi au lieu d'utiliser directement les courants avec de pareilles tensions, on abaisse préalablement celle-ci à des limites convenables, c'est le but des *transformateurs*.

306. **Principe des transformateurs.** — Soient deux bobines formées de fils conducteurs l'une B composée d'un grand nombre de spires de fil fin, l'autre A d'un petit nombre de spires de gros conducteurs (fig. 260). Si nous envoyons des courants rapidement alternés à travers la première, la seconde sera traversée également par des courants alternatifs dont l'intensité dépend de la résistance du circuit.

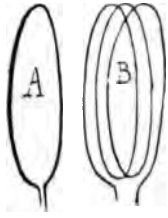


Fig. 260.

Si E est la force électromotrice qui fait circuler le courant i dans la bobine B, une force électromotrice e sera développée dans A et il en résultera un courant d'intensité I.

Si la transformation s'opérait sans perte, l'énergie Ei dépensée dans la bobine B appelée *circuit primaire* devait se retrouver totalement dans le *circuit secondaire* A, on aurait par conséquent

$$Ei = eI.$$

Ainsi si E = 1000 Volts et i = 10 Ampères, on pourrait avoir, par exemple, e = 100 Volts et I = 100 Ampères, de façon que la puissance dépensée dans le premier circuit étant de 1000 Watts, on retrouverait cette même puissance dans le circuit secondaire ; mais le courant de haute tension et de faible intensité serait *transformé* en un autre de faible tension et de grande inten-

sité, de là vient le nom de *transformateurs* donné à ces appareils.

Ces appareils permettent de transporter l'énergie électrique à haute tension et par conséquent dans les conditions les plus favorables au point de vue des dépenses de premier établissement, et de réduire cette tension en dessous des limites dangereuses au moment où l'on veut utiliser l'énergie transportée.

307. **Premiers transformateurs.** — Le premier transformateur a été construit par Faraday en 1831, et lui a servi à faire ses expériences célèbres sur les courants d'induction. Il se composait (fig. 261) d'un anneau en fer doux C autour duquel il avait enroulé deux circuits dont l'un primaire et l'autre secondaire. Le passage des courants interrompus dans le premier déterminait l'aimantation du fer, et ces aimantations successives donnaient naissance dans le second à des courants induits (217).

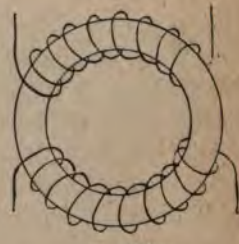


Fig. 261.

En 1848, Ruhmkorff construisit l'appareil d'induction connu sous le nom de *bobine de Rhumkorff* et qui servait à reproduire, au moyen d'un courant engendré par des piles, les phénomènes d'électricité statique. Le problème à résoudre était donc l'inverse de celui qui est aujourd'hui résolu par l'emploi des transformateurs. Le circuit primaire A était composé d'une bobine à gros fil faisant un petit nombre de tours, tandis que le circuit secondaire était formé de fil fin de longueur très considérable. Le courant primaire était produit par une pile P (fig. 262).

Voici la disposition adoptée pour produire les interruptions de ce courant : à l'intérieur de la bobine A se trouve un noyau de fer doux, devant lequel est fixé un

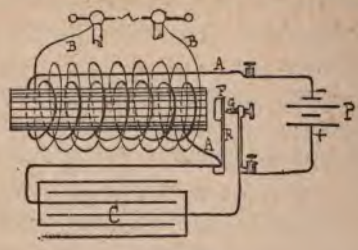


Fig. 262.

ressort R portant une armature F en fer doux. Dès que le courant est établi, F est attiré et le circuit est interrompu en G, le ressort ramène F dans sa position première, le courant est rétabli de nouveau et ainsi de suite.

On intercale un condensateur C entre les deux points où se produit la rupture du courant, afin que celle-ci soit plus nette, et de supprimer l'étincelle d'extra-courant d'ouverture, celui-ci trouvant un écoulement dans le condensateur dont la décharge vient s'ajouter au courant primaire lors de la fermeture.

Avec cet appareil, on arrive à faire jaillir une étincelle de 40 et même 50 centimètres de longueur entre les extrémités du circuit secondaire, le courant primaire ayant une intensité de 15 à 20 ampères et circulant sous une pression de 4 à 5 volts.

On peut supprimer les accessoires donnant lieu aux interruptions, il suffit pour cela d'envoyer dans le fil primaire le courant d'une machine à courants alternatifs.

308. Transformateurs Gaulard et Gibbs, Zypernowsky-Deri-Blathy.

— L'application des transformateurs à l'industrie est très récente; Gaulard et Gibbs paraissent être les premiers qui aient fait un emploi de ces appareils sur une grande échelle.

Leur bobine d'induction était en réalité une bobine de Ruhmkorff renversée, c'est-à-dire le fil primaire était traversé par le courant à haute tension et celle-ci était ramenée à 100 volts, force électromotrice généralement employée pour les lampes à incandescence.

MM. *Zypernowsky-Deri-Blathy* ont repris la forme primitive de Faraday en donnant aux fils des diamètres appropriés. Le noyau en fer doux (fig. 263) est composé

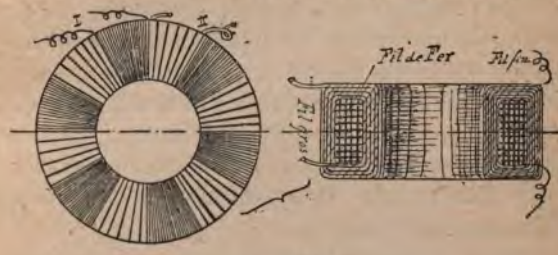


Fig. 263.

d'un fil de fer enroulé et les circuits primaire et secondaire sont formés de plusieurs sections, de sorte que l'appareil ressemble à un anneau Gramme sans collecteur.

Cette forme a l'avantage de donner un circuit magnétique continu et présentant la plus petite résistance possible.

Le rendement de ces appareils est très élevé, il atteint 95 p. 100 industriellement.

C'est-à-dire que pour une puissance de 10,000 Watts dépensée dans le circuit primaire (1000 Volts 10 Ampères) on en recueille 9500 (100 Volts 95 Ampères) dans

le circuit secondaire; la perte correspond à l'échauffement du transformateur.

309. **Transformateurs à courant continu.** — Les courants alternatifs présentent l'inconvénient d'être plus dangereux que les courants continus, ils ne se prêtent pas facilement (du moins jusque maintenant) au fonctionnement des moteurs, on ne peut pas s'en servir pour l'électrochimie; aussi on a voulu également transformer les courants continus à haute tension. Seulement pour créer des courants d'induction il faut introduire un appareil mécanique déterminant les interruptions du courant.

Si nous supposons un moteur électrique à courant continu dont une section sur deux seulement soit réunie au commutateur qui amène le courant, et dont les autres sections soient réunies à un autre collecteur, les courants passant dans les sections d'ordre impair induiront à chaque interruption des courants secondaires dans les sections d'ordre pair, et ces derniers seront recueillis par le second collecteur.

Le travail nécessaire pour faire tourner l'anneau est très faible, en outre ces appareils ne donnent pas d'étincelles aux balais, l'entretien paraît donc devoir être insignifiant. Cependant ils exigent une surveillance alors que les transformateurs à courants alternatifs peuvent être abandonnés à eux-mêmes ; aussi ces derniers sont-ils infiniment plus répandus.

310. **Distribution de l'énergie électrique.** — Généralement l'énergie électrique développée dans une dynamo, doit être répartie entre un certain nombre de consommateurs, lampes électriques, moteurs, etc. On peut employer pour cela un certain nombre de dispositions dont les principales sont les suivantes :

I. — En tension.
II. — En dérivation.
a) Distribution directe.
b) Avec transformateurs.
III. — Tension et dérivation combinées.
IV. — Conducteurs multiples.
V. — Par l'intermédiaire d'accumulateurs.

Nous allons passer rapidement en revue ces différents systèmes.

324. **Distribution en tension.** — (Fig. 264). Elle consiste à

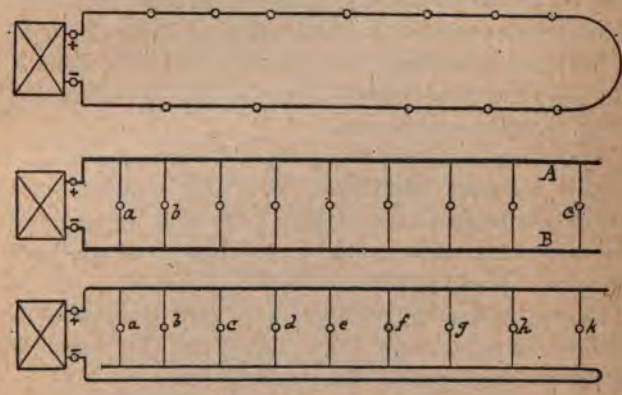


Fig. 264, 265 et 266.

intercaler tous les appareils récepteurs, lampes, moteurs, sur un même circuit parcouru par un courant dont l'intensité est maintenue constante. La différence du potentiel aux bornes de la source doit donc varier comme la résistance du circuit.

Ce système n'est guère employé que pour l'éclairage électrique par arc. En Amérique, les compagnies Brush

et Thompson-Houston, intercalent jusqu'à 96 lampes à arc dans un seul circuit, le courant a généralement une intensité de 10 Ampères. La chute du potentiel nécessaire pour chaque lampe étant de 50 Volts, il en résulte que la source d'électricité doit produire une force électromotrice d'au moins 4800 Volts.

Ce système présente les avantages qui résultent de la haute tension, les frais d'installation sont réduits à un minimum ; seulement ils en présentent tous les inconvénients, dont les principaux sont : les dangers que présentent les hautes tensions pour les personnes, le manque d'indépendance entre les différents appareils récepteurs.

Nous avons indiqué les précautions prises dans les lampes à arc pour arriver à rendre cette indépendance aussi complète que possible.

On intercale même des lampes à incandescence de grande intensité lumineuse, 100 à 200 bougies, sur le circuit des lampes à arc. Il faut avoir soin de les munir de dispositifs convenables pour assurer la continuité du circuit quand une lampe vient à se briser.

La disposition en tension est la plus économique et peut souvent convenir pour l'éclairage des rues, des chantiers et en général des grands espaces.

311. **Distribution en dérivation.** — *a*) **Distribution directe.** — Elle consiste à maintenir constante la différence de potentiel entre les conducteurs principaux A et B, entre lesquels on place en dérivation les appareils consommateurs tels que lampes à arc ou à incandescence, accumulateurs, bains de galvanoplastie, etc. (fig. 265).

Il existe une indépendance complète entre les divers appareils que l'on peut supprimer ou intercaler à volonté.

La seule difficulté est d'arriver à maintenir la même

différence de potentiel sur toute la longueur des conducteurs A et B ; il est clair que la longueur du conducteur que doit parcourir le courant pour arriver en *c*, étant plus grande que pour les appareils *a* et *b*, la différence de potentiel en *c* sera plus petite qu'en *b*, à moins que la résistance des conducteurs principaux A et B soit négligeable, par rapport à celle des appareils placés en dérivation. On obvie à cet inconvénient par la disposition représentée (fig. 266). Il est facile de voir que le chemin à parcourir par le courant en passant par chaque appareil est exactement le même.

Dans les grandes installations, le réseau est quelquefois assez complexe, il y a des conduites secondaires (fig. 267) qui viennent s'embrancher sur les conducteurs

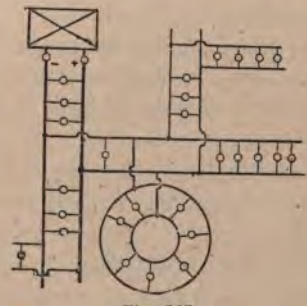


Fig. 267.

principaux, et qui peuvent se ramifier et se subdiviser elles-mêmes.

Lorsque le nombre d'appareils qui fonctionnent en même temps est très variable, la perte en volts dans les conduites variant proportionnellement à l'intensité du courant qui les parcoure, il en résulte que pour mainte-

nir une différence de potentiel constante aux appareils, il faut que la force électromotrice de la source augmente avec son débit, à moins que la résistance des conducteurs soit absolument négligeable.

Ainsi si une canalisation pour une installation est établie de façon qu'il y ait une perte de 10 volts, par exemple qu'il y ait 110 volts à la dynamo et 100 volts aux lampes, lorsque la moitié des lampes sera éteinte on n'aura plus qu'une perte de 5 volts et si la dynamo est à tension constante ou il y aura 105 volts aux bornes des lampes ce qui serait inadmissible.

Pour pouvoir employer des dynamos à tension constante, il faut donc que la perte de charge ne varie pas de plus de 2 p. 100 de la tension lorsque l'intensité du courant varie de zéro à son maximum, il faut donc des conducteurs de résistance négligeable.

Il résulte de là que l'emploi des machines Compound n'est possible que dans les petites installations, à moins que l'on ne veuille faire des dépenses considérables de premier établissement.

Dans la plupart des cas, les machines excitées en dérivation avec champ magnétique réglable seront beaucoup plus avantageuses.

312. *b*) **Distribution par l'intermédiaire de transformateurs.** — Lorsque la source d'électricité ne peut pas être placée dans le voisinage immédiat des lieux de consommation, on développe des tensions très élevées entre les deux conducteurs principaux, généralement 1000 volts et l'on ramène cette tension généralement à 100 volts au moyen de transformateurs placés au lieu même de consommation (fig. 268). On peut utiliser dans ce but les courants continus ou les courants alternatifs.

Les lignes parcourues par les courants à haute tension, sont établies de façon qu'elles soient hors de la

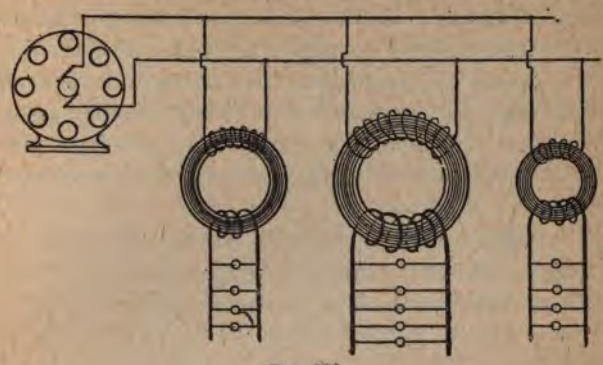


Fig. 268.

portée des personnes et l'on n'introduit l'énergie électrique dans les lieux habités que dans des conditions où elle ne peut pas donner lieu à des accidents.

Il existe actuellement, tant en Europe qu'aux États-Unis d'Amérique et en Australie, des centaines de stations centrales d'éclairage électrique par transformateurs à courants alternatifs.

Les principaux reproches que l'on puisse faire à ce système sont : 1° l'impossibilité d'utiliser les courants alternatifs pour l'électro-métallurgie et le chargement des accumulateurs ; 2° il n'existe pas, jusque maintenant, des moteurs à courants alternatifs bien pratiques.

Les machines à courants alternatifs sont réversibles comme celles à courants continus, seulement elles doivent d'abord être lancées, c'est-à-dire amenées à une vitesse telle que les phases de la force contre-électromotrice qu'elles produisent soient les mêmes que celles de la géné-

ratrice. Le moteur étant mis en train si l'on augmente sa charge un peu brusquement, il en résultera un changement de vitesse et la rupture de la concordance des phases entre la génératrice et le moteur, d'où arrêt de celui-ci.

Nous pensons que le jour où l'on aura inventé un moteur à courants alternatifs d'un fonctionnement assuré et d'un prix raisonnable, on aura fait un grand pas pour la multiplication des stations centrales d'éclairage électrique.

313. **Tension et dérivation combinées.**— Dans certains cas, on partage le courant d'une distribution à intensité constante entre différentes lampes placées en dérivation.

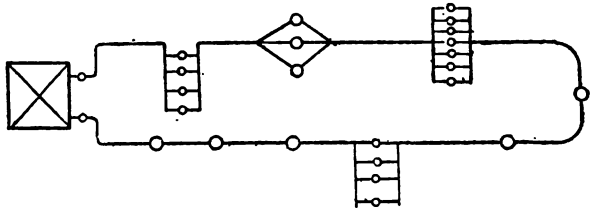


Fig. 269.

Ainsi sur un courant de 10 ampères on peut placer en dérivation deux lampes, chacune de 5 ampères.

Si l'on place 10 lampes à incandescence en dérivation, chacune d'elle sera traversée par un courant de 1 ampère, et si la résistance de chacune d'elles est de 50 ohms, la chute de potentiel d'une borne à l'autre sera de 50 volts, et chaque lampe absorbera une puissance de 50 watts.

Le grand défaut de ce système, c'est que chaque fois qu'une lampe à incandescence s'éteint, elle doit être remplacée par une résistance équivalente, sinon celles

qui sont accouplées avec elle en parallèle atteindraient une température qui peut devenir dangereuse.

314. **Distribution à conducteurs multiples. — Distribution à trois fils Edison-Hopkinson.** — Nous allons exposer brièvement le système à trois conducteurs Edison-Hopkinson. Deux machines dynamos sont accouplées en tension, on établit 3 conducteurs : C réuni au pôle positif de A, E réuni au pôle négatif de B, le troisième D appelé conducteur neutre est mis en comunication avec le pôle — de A et le pôle + de B. (fig. 270*a*).

Supposons d'abord qu'il y ait un nombre égal de lampes allumées entre C et D et entre D et E comme l'indique la figure 270 (*b*) si toutes les lampes sont de même intensité, le conducteur neutre ne sera parcouru par aucun courant et il pourra être interrompu en *a* sans qu'aucun changement soit introduit dans le régime des courants, nous avons en réalité deux machines en tension alimentant des lampes montées par 2 en tension.

Si maintenant nous supprimons toutes les lampes entre D et E, B ne fournira plus de courant, A fonctionnera seule, et le conducteur neutre sera devenu le conducteur de retour de cette dynamo (fig. 270*c*).

Si un nombre inégal de lampes est intercalé de C à D et de D à E, le fil neutre sera parcouru par un courant égal à la différence des intensités fournies par A et par B (fig. 270*d*).

Prenons un exemple pour montrer l'utilité du système.

Supposons que nous ayons une installation réclamant une intensité totale de 100 ampères, avec le système à 2 conducteurs, chaque conducteur principal devra avoir un diamètre suffisant pour transmettre 100 ampères, il aura une section que j'appelle 1, la quantité totale de

matière pour les conducteurs positif et négatif pourra être appelée 2.

Avec deux machines accouplées, comme nous venons de les voir, chacun des conducteurs positif, négatif et neutre ne devra jamais transmettre qu'un courant maximum de 50 ampères, sa section ne devra donc être que 1/2, la quantité totale de matière pour les trois con-

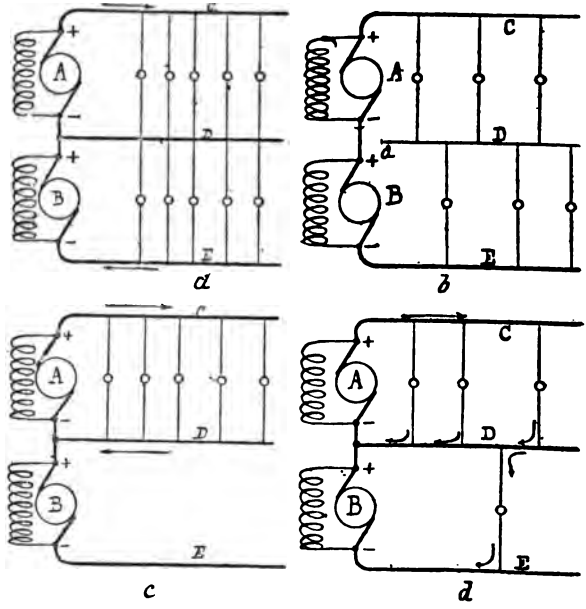


Fig. 270.

ducteurs sera donc 1 1/2, l'économie de matière sera donc de 1/2, soit 25 p. 100 de la quantité de cuivre qui irait été employée avec le système à deux conducteurs.

On pourrait employer 4 conducteurs avec 3 machines, 5 conducteurs et 4 machines, etc., l'économie dans les conducteurs deviendrait de plus en plus grande.

Pratiquement on n'emploie que le système à trois conducteurs qui donne de très bons résultats.

315. **Distribution par l'intermédiaire d'accumulateurs.** — Soit A une machine dynamo électrique envoyant son courant à travers un certain nombre de batteries d'accumulateurs I, II, III, etc. (fig. 271) ayant chacune, par exemple,

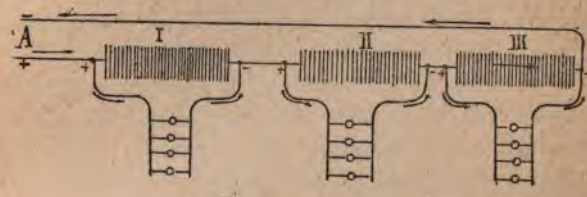


Fig. 271.

100 volts de force électromotrice sur chacune des batteries, nous pouvons monter des dérivations destinées à alimenter des lampes, moteurs, etc., la dynamo A, pourra être placée en un point très éloigné et les batteries réparties en un certain nombre d'endroits différents, de façon à former des centres de distribution alimentant des édifices ou des groupes de maisons.

Ce système présente des avantages considérables. D'abord l'emploi des accuuulateurs assure une alimentation continue, même en cas d'arrêt de la machine; mais il en est un autre qu'il est seul à présenter : dans une station centrale d'éclairage alimentant 20,000 lampes, la demande de lumière de 3 heures du matin à 3 heures du soir est presque nulle, de 3 à 7 heures du

soir, elle s'élève régulièrement jusqu'à 7,500 lampes, (7 à 8 heures, elle monte rapidement à 15,000 lamp pour retomber à 7,500 lampes de 8 à 10 heures du soi En résumé pour une moyenne par vingt-quatre heures (2,275 lampes, la station centrale doit avoir des machin à même de fournir le courant à 15,000 lampes, alors qu cette demande ne se produit que pendant une dem heure à peine.

Le système représenté fig. 271, permet de faire tr vailler les machines pendant vingt-quatre heures cons cutives, on emmagasine l'énergie dans les accumulateu pour pouvoir la dépenser au moment voulu.

Les moteurs et les dynamos ne doivent avoir que puissance nécessaire pour fournir le courant moyen co respondant à 2,275 lampes. On a établi à Londres d stations centrales d'après ce système, l'expérience seu pourra se prononcer sur la façon de se comporter d accumulateurs. Ceux-ci, d'ailleurs, constituent u dépense importante.

CHAPITRE XXIII

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE

316. **But de la télégraphie. — Parties constituantes des postes télégraphiques.** — La télégraphie, comme son nom l'indique, a pour but de transmettre des signaux entre des points plus ou moins éloignés l'un de l'autre.

Si deux stations A et B sont réunies par un circuit formé d'un fil métallique, dans lequel se trouve intercalé une pile, (fig. 272) si en A se trouve un interrupteur et

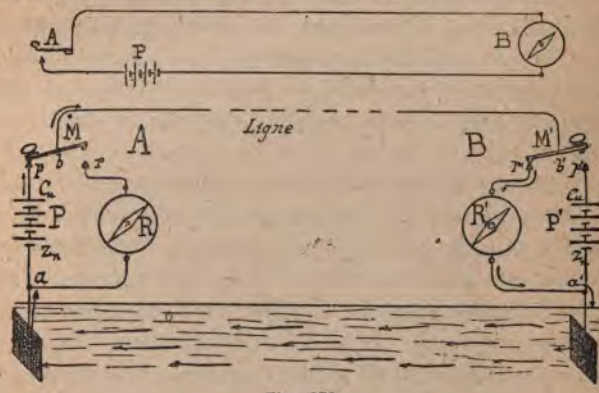


Fig. 272.

en B un galvanoscope, chaque fois que le circuit sera fermé en A, le galvanoscope B accusera le passage du courant. En espaçant les émissions et les interruptions d'une façon convenue à l'avance, la station A pourra transmettre à B une série d'indications.

Cette disposition ne permettrait de transmettre des signaux que dans une seule direction, ce qui, dans la grande généralité des cas, ne suffit pas, aussi chaque station est-elle pourvue : 1° d'un interrupteur M, appelé *manipulateur*, qui permet d'envoyer des courants au correspondant; 2° d'une pile P, et 3° d'un galvanoscope ou *récepteur* R servant à accuser le passage du courant et à permettre de recevoir le signal transmis.

Au lieu de faire usage de deux fils conducteurs formant circuit métallique complet entre les deux stations, on emploie un seul conducteur qui porte le nom de *ligne télégraphique ;* les deux extrémités de la ligne sont mises en communication avec le sol par l'intermédiaire, d'une part de la pile, d'autre part, du récepteur. Les points *a* et *a'* du sol, aussi éloignés qu'ils soient, se trouvant au même potentiel, les choses se passent comme si ces deux points étaient réunis par un conducteur sans résistance.

Le contact des extrémités du conducteur avec la terre doit être rendu aussi intime que possible, pour cela on enfouit dans le sol humide une plaque métallique que l'on appelle *plaque de terre* ou simplement *terre*.

317. **Fonctionnement des appareils.** — Supposons que le poste A transmette un message à son correspondant B, le manipulateur M' de B reste au repos. Le manipulateur se compose d'un levier métallique pouvant basculer autour de son axe *b*. La ligne est toujours en communication avec le levier; à l'état de repos, celui-ci reposant sur le buttoir *r* la ligne est mise en communication avec la terre par l'intermédiaire du récepteur R. Si l'on appuie sur le manipulateur, le contact en *r* est rompu, mais le circuit de la pile P est fermé par *a p b b' r' a'* ; dans ce

cas le récepteur R′ fonctionne et la pile P′ n'intervient pas.

319. **Différents sysfèmes d'appareils télégraphiques. — Appareil Wheatstone.** — Les premiers appareils récepteurs en usage ont été de simples galvanoscopes composés d'une aiguille aimantée autour de laquelle se trouve un multiplicateur. On ne pouvait transmettre que deux signaux correspondant à une déviation de l'aiguille, dans un sens ou dans l'autre. On différenciait les lettres de l'alphabet par le nombre d'émissions de courant. Le manipulateur doit permettre de renverser le sens du courant.

Ce système qui date de 1837 porte le nom de Wheatstone son inventeur, il est encore en usage en Angleterre; mais sur le continent il est généralement abandonné et il a été remplacé par le télégraphe Morse.

320. **Appareil Morse.** — L'appareil télégraphique de Morse présente l'avantage important d'enregistrer les signaux sur une bande de papier et par conséquent de garder la trace du message reçu. On emploie des courants qui sont toujours du même sens pour la transmission des signaux qui sont au nombre de deux, savoir un bref et un long.

Voici quelles sont les parties constitutives de l'appareil (fig. 273) : le courant est reçu dans un électro-aimant A et de là il va à la terre; l'armature mobile B de cet électro, est portée par un levier pivotant autour d'un arc horizontal C. Quand un courant passe dans l'électro, B est attiré, le levier bascule et le ressort R le ramène dans sa position dès que le courant cesse. En basculant, l'extrémité du levier vient soulever la bande de papier DD′ qui est entraînée d'une façon continue par les deux cylindres EE′ mûs par un mouvement d'horlo-

gerie. La bande de papier étant soulevée vient frott contre une molette F animée d'un mouvement de rot tion, par suite duquel sa tranche est continuelleme

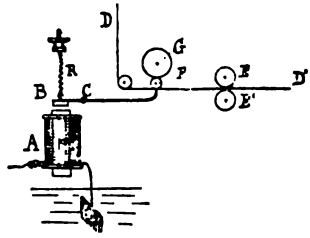


Fig. 273.

enduite d'encre qu'elle prend sur un tampon en coton (Suivant que l'émission du courant dure plus ou moin de temps, le contact entre la bande de papier et F es plus ou moins prolongé et la molette trace soit un point (soit un trait (—). En combinant ces deux signaux d diverses façons, on a composé un alphabet connu sou le nom de *code Morse* qui permet de transmettre toute les dépêches usuelles. Voici quelques-uns de ces signe conventionnels :

A . —	F . . — .	Point	. . . . .
B — . . .	G — — .	Apostrophe	. — — — —
C — . — .	H	1	. — — — —
D — . .	I . .	2	. . — — —
E .	J . — — —	3	. . . — —

321. **Appareil à cadran.** — Les deux systèmes que nou venons de décrire ont le défaut de ne pas transmettre le dépêches au moyen des signaux alphabétiques ordi naires; il faut un certain apprentissage pour arriver à le traduire; pour obvier à cet inconvénient on emploi

quelquefois les appareils dits à cadran. Ils sont basés sur le principe suivant : Supposons une horloge ordinaire à balancier et à échappement, à chaque oscillation du balancier la grande aiguille avance d'une certaine quantité ; supposons que le cadran soit divisé en 25 parties portant chacune une lettre, et qu'à chaque battement du pendule la grande aiguille avance de 1/25 de circonférence. Supprimons maintenant le pendule et faisons fonctionner l'échappement au moyen d'un électro-aimant, chaque fois que l'on enverra un courant, l'aiguille sautera de 1/25e de circonférence ; en partant du zéro, pour une émission l'aiguille s'arrêtera sur A, pour deux émissions sur B, pour trois émissions sur C et ainsi de suite.

Pour différencier nettement les signaux, après chaque lettre on ramène l'aiguille au zéro ; il en résulte que l'envoi d'une lettre demande 25 émissions de courant ; aussi cet appareil est très lent et il est presque généralement abandonné sauf dans des cas spéciaux et pour des communications peu importantes.

322. **Appareil Hughes.** — L'appareil précédent ne permet pas d'enregistrer le message transmis, l'appareil Hughes au contraire imprime la dépêche en caractères ordinaires sur une bande de papier, en outre la transmission de chaque lettre ne demande qu'une émission de courant.

Voici sommairement le principe sur lequel repose cet appareil (1). Dans chacune des deux stations correspondantes, une roue circulaire dont la jante porte gravée les différents caractères à transmettre, tourne d'un mou-

(1) Pour la description détaillée voir les traités spéciaux de télégraphie et notamment le « Traité élémentaire de télégraphie de M. Mercadier. »

vement uniforme le mouvement des deux roues doi être synchronique, c'est-à-dire que les deux roues dite *roues des types* doivent tourner avec la même vitess et toujours garder la même position relative, ainsi l lettre A par exemple doit toujours se trouver en même temps sur le diamètre vertical aux deux postes correspondants entre eux. Supposons que l'on veuille transmettre la lettre B, au moment où cette lettre passe sur la verticale dans le poste transmetteur, un courant est envoyé et déclanche chez le correspondant un mécanisme qui vient appliquer la bande de papier contre la roue des types, de sorte que la lettre B est imprimée à son passage sur la verticale.

L'appareil Hughes permet de transmettre plus de lettres que l'appareil Morse dans le même temps, en outre on évite l'inconvénient de la traduction du télégramme, ce qui supprime une cause d'erreur. Aussi il est très employé sur le continent pour les relations importantes.

323. **Réception à l'ouïe. — Parleur.** — En Angleterre et surtout en Amérique, on n'attache que peu d'importance à l'enregistrement des signaux, aussi on reçoit simplement les télégrammes à l'ouïe. Dans l'appareil Morse, l'armature de l'électro-aimant, en venant frapper sur les vis de buttée, produit un léger bruit, on distingue ainsi à l'ouïe si c'est un signal long ou court, par conséquent un point ou un trait qui est transmis ; avec un peu d'habitude les employés arrivent à comprendre les signaux sans qu'il soit nécessaire de les inscrire. Aussi aux Etats-Unis on réduit l'appareil Morse à son électro-aimant muni de son armature, le récepteur ainsi ramené à sa plus simple expression porte le nom de *parleur*.

323. **Relais.** — Lorsque la distance entre les deux sta-

tions est très longue, une partie du courant va directement à la terre par suite du défaut d'isolement de la ligne; lorsqu'il arrive que l'intensité du courant reçu au poste récepteur n'est plus suffisante pour faire fonctionner l'appareil télégraphique, on fait usage d'un appareil intermédiaire que l'on nomme *relais* (fig. 274).

Le relais se compose d'un électro-aimant A actionnant un levier très léger B qui joue le rôle de manipulateur et qui envoie dans le récepteur le courant d'une pile locale P.

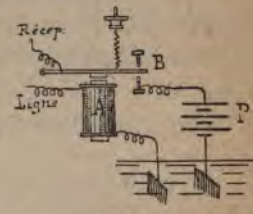


Fig. 274.

325. **Signaux accoustiques.** — Lorsque l'on ne doit transmettre qu'un petit nombre d'indications, toujours les mêmes et qu'en outre, on doit attirer l'attention d'une personne qui ne se trouve pas près de l'appareil, on fait usage d'une sonnerie.

L'appareil électrique le plus universellement répandu est probablement la *sonnerie trembleuse* dont l'invention est due à feu Lippens, mécanicien des télégraphes belges (fig. 275).

Fig. 275.

Cet appareil se compose d'un électro-aimant A dont l'armature en fer doux B est portée par un ressort *r*.

Dès que le courant est établi, B est attiré et le circuit est rompu en C; la tension du ressort ramène l'armature à sa position initiale et ainsi de suite, de sorte que le marteau D, porté par l'armature est animé d'un mouvement alternatif très rapide et vient frapper le timbre F.

326. **Transmissions télégraphiques Duplex.** — Lorsque la distance entre deux stations est considérable, et que le nombre de dépêches à transmettre est trop grand pour qu'une seule ligne puisse suffire au trafic, on transmet à la fois des télégrammes dans les deux sens par le même fil en employant la méthode Duplex.

On peut employer dans ce but soit des *appareils différentiels*, soit la méthode du *pont de Wheatstone ;* cette dernière est la plus simple et la plus généralement employée.

La fig. 276 représente la disposition schématique d'une

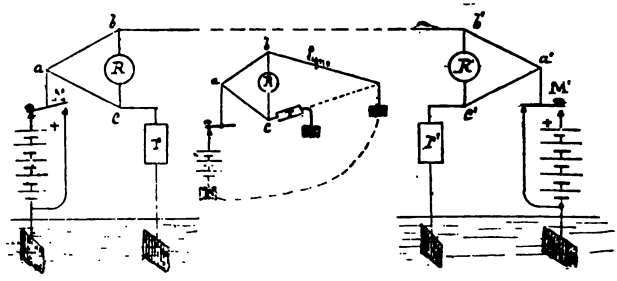


Fig. 276.

transmission Duplex par le pont de Wheatstone.

Il faut que le récepteur R ne se meuve que pour les courants émanant de M' et de même R' pour les courants émis par M.

Pour cela, en *a* le courant se divise en deux en suivant les branches *ab* et *ac*, de *c* il se rend à la terre par une résistance *r* et de *b* il continue par la ligne. Si l'on a la relation :

Résistance *ab* × *r* = résistance *ac* × ligne

aucun courant ne passera par R que l'on fasse ou non

mouvoir le manipulateur M. Donc R ne sera pas sensible aux courants provenant de M, au poste d'arrivée, ce courant se divisera entre R' et *b' a'*, le récepteur R' sera donc influencé.

Si pendant que M envoie un courant, M' appuie également sur son manipulateur, ces deux courants de sens contraire s'annuleront sur la ligne mais dans chaque poste une partie du courant passera par le récepteur et le fera fonctionner aussi longtemps que les deux clefs seront abaissées en même temps. Si B cesse d'envoyer son courant aussitôt R' cesse de fonctionner, et R est seul influencé.

Ordinairement on fait : (résistance *ab*) = (résistance *ac*) et il en résulte que r = résistance de la ligne.

Les piles dans chaque poste doivent donner la même force électromotrice.

327. **Transmission diplex et quadruplex.** — Le système *diplex* permet de transmettre à la fois deux messages dans le *même sens*. Il suffit d'avoir pour cela au poste d'arrivée des récepteurs ne fonctionnant qu'avec des courants d'une certaine direction, ce qui s'obtient en employant des relais appropriés.

En montant en *duplex* des appareils *diplex*, on peut transmettre à la fois *deux dépêches dans chaque sens*, ce qui constitue un *système quadruplex*.

328. **Systèmes multiples.** — Quand on emploie le code Morse, il y a un certain temps perdu entre deux émissions successives, on peut utiliser la ligne plus complètement en employant des appareils *multiples*. Supposons qu'à chaque extrémité de la ligne se trouvent 4 appareils A, B, C, D. A', B', C', D'. Ces appareils sont mis deux à deux successivement en communication au moyen d'un

dispositif appelé distributeur, seulement pendant le temps nécessaire pour transmettre un signal ; chaque employé dispose donc à son tour de la ligne, et dès que son signal est transmis il prépare le suivant qui sera envoyé en temps voulu.

Les systèmes multiples exigent donc aux postes de départ et d'arrivée l'emploi d'un appareil appelé distributeur, les deux distributeurs doivent toujours marcher parfaitement d'accord, leur mouvement doit être synchronique comme dans l'appareil Hughes, sinon au lieu d'avoir toujours A en communication avec A', à un moment donné A serait en relation avec B' ou C'.

Les systèmes multiples sont très avantageux au point de vue de l'utilisation des lignes télégraphiques.

329. **Téléphone de Bell.** — Le téléphone de Bell permet de transmettre la parole à distance. Soit un disque en tôle A, fixé par son contour et pouvant vibrer devant le pôle d'un aimant B portant une bobine C. Si l'on parle devant le diaphragme A, il entre en vibration, le déplacement de cette masse de fer dans le champ magnétique de l'aimant B produit des courants induits dans la bobine C. En somme le téléphone constitue une petite machine magnéto-électrique (fig. 277).

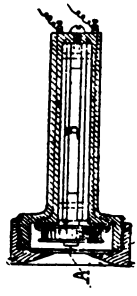


Fig. 277.

Le téléphone est réversible comme les autres machines dynamo-électriques, c'est-à-dire que si l'on envoie dans la bobine C' d'un appareil semblable à celui que nous venons de décrire les courants engendrés dans la bobine C, la plaque A' du téléphone récepteur vibrera de la même façon que A, et ces vibrations

reproduiront tous les sons émis devant ce dernier.

Le rendement des appareils téléphoniques est soumis aux mêmes causes de déchet que la transmission de l'énergie au moyen des machines dynamo-électriques : il en résulte qu'avec le téléphone tel que nous venons de le décrire on ne peut transmettre la parole qu'à une distance assez faible. Pour arriver à une portée considérable il faut employer une source de courant plus intense que celle provenant du simple déplacement de la plaque de fer doux dans le champ d'un aimant; c'est le but du *microphone*.

330. **Microphone de Hughes.** — Sur une planchette verticale A, on fixe deux supports en charbon de cornue B et B′ présentant chacun une petite cavité dans laquelle vient s'engager une baguette verticale C (fig. 278) dont les extrémités sont terminées en pointe. Si l'on réunit les pièces B et B′ par un conducteur dans lequel on intercale une pile P et un téléphone T, les sons émis devant la baguette C mettront celle-ci en vibration, il en résultera des variations dans la pression qu'elle exerce sur ces supports. Ces changements de pression déterminent des variations correspondantes dans la résistance des contacts et par conséquent des augmentations et des diminutions de l'intensité du courant qui parcourt le téléphone.

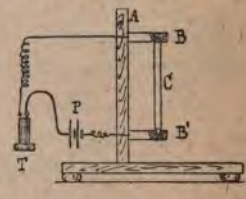


Fig. 278.

Le champ magnétique de la bobine C du récepteur (fig. 276) subira des variations correspondantes et le diaphragme A du téléphone se trouvant dans un champ magnétique variable entrera en vibration.

Tous les sons émis devant la baguette de charbon C seront perçus dans le téléphone, d'une façon beaucoup plus intense que si l'on avait employé un autre téléphone comme transmetteur, parce que les variations de courant produites par le changement de la résistance des contacts de charbon, sont bien plus considérables que les courants induits produits par les vibrations du disque du téléphone transmetteur. C'est ce qui a fait donner à l'appareil que nous venons de décrire le nom de *microphone* ou *transmetteur microphonique*.

331. **Microphone d'Edison.** — Le fonctionnement de cet appareil est basé sur la variation de résistance électrique que présente une pastille de noir de fumée A comprise entre deux plaques de platine, lorsqu'elle est soumise à une pression variable (fig. 279).

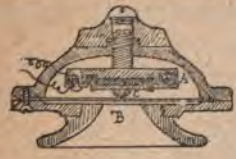


Fig. 279.

Lorsque l'on parle devant l'embouchure D de l'appareil, le diaphragme B entre en vibration et la pression exercée sur la pastille A par l'intermédiaire du bouton C produit les changements de résistance.

Il en résulte que les sons émis devant cet appareil, peuvent être reçus à distance dans un téléphone comme avec l'appareil de Hughes décrit plus haut.

332. **Microphone de Blake.** — Il y a une quantité innombrable de systèmes de contacts microphoniques qui reposent toujours sur le même principe, nous allons seulement décrire les deux types les plus répandus.

Dans le *microphone de Blake* (fig. 280), le contact est formé par un petit bouton de platine A, pressé par la plaque vibrante B contre une pastille en charbon, le

courant passe par les ressorts qui supportent ces deux pièces. Le réglage de l'appareil s'opère au moyen de la vis V, qui permet de tendre plus ou moins les ressorts qui déterminent la pression entre les diverses parties du contact microphonique.

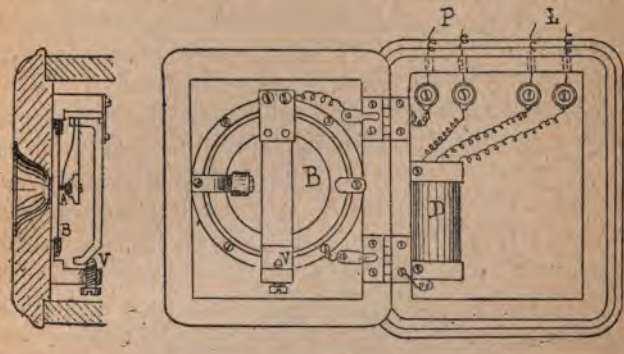


Fig. 280.

333. **Microphone Ader** (fig. 281). — Cet appareil est une modification de celui de Hughes, les contacts sont placés sous une planchette mince en sapin plus ou moins inclinée.

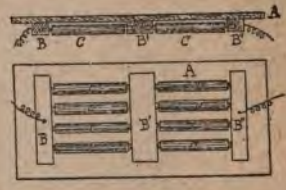


Fig. 281.

Sous cette planchette sont fixés trois supports en charbon B, B' B'', dans lesquels s'engagent les extrémités des charbons C au nombre de 8 montés par quatre en quantité.

Il y a un très grand nombre de variantes de cet appareil.

334. **Emploi de la bobine d'induction dans les microphones.** — Lorsque l'on doit transmettre la parole à grande distance, on observe que l'on obtient des résultats beaucoup plus satisfaisants, en employant une bobine d'induction comme intermédiaire entre le microphone et le téléphone (fig. 282). Le contact microphonique est placé avec la pile sur le gros fil de la bobine, les extrémités du fil fin sont en communication avec le téléphone.

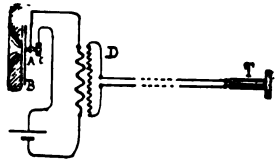


Fig. 282.

En employant cette disposition, les courants primaires du circuit microphonique ne sont pas envoyés directement dans la ligne mais sont transformés en d'autres de plus faible intensité et de force électromotrice plus élevée ; nous avons vu, à propos des moteurs électriques, que ce sont là des conditions très favorables au point de vue du rendement, le téléphone pouvant être assimilé à un appareil dynamo-électrique.

L'emploi de la bobine d'induction permet donc d'augmenter considérablement la distance à laquelle les communications téléphoniques peuvent s'échanger.

La figure 280 représente un microphone de Blake complet avec sa bobine d'induction D.

335. **Composition d'un poste téléphonique.** — Un poste téléphonique doit comprendre.

1° Un microphone transmetteur avec sa pile et sa bobine d'induction.

2° Un ou deux téléphones récepteurs.

3° Les appareils d'appel.

La résistance du circuit comprenant le microphone, a pile et le fil primaire de la bobine d'induction doit

être la plus petite possible afin que les faibles variations du contact donnent lieu à un changement notable de l'intensité du courant; il résulte de là que l'on doit faire usage de piles de faible résistance intérieure, le circuit primaire de la bobine doit également avoir une faible résistance électrique.

On fait généralement usage de la pile Leclanché parce que son entretien est facile, sa force électromotrice est relativement grande et sa résistance intérieure est assez faible surtout si l'on emploie le modèle à agglomérés ou le type Warnon avec zinc de grande surface. Seulement il faut employer un nombre d'éléments tel que le courant à fournir par chacun d'eux ne dépasse pas 50 milliampères, sinon la pile se polarise rapidement. Généralement un seul élément suffit, dans le microphone Ader on emploie 3 éléments du type de 0^m13 de haut accouplés en quantité.

Pour faire les appels on emploie comme source de courant une petite machine magnéto-électriqne, qui sous un faible volume, peut donner une force électromotrice assez grande.

336. **Des conditions que doit remplir une ligne téléphonique.** — Nous avons vu que les courants ne s'établissent pas d'une façon instantannée dans les conducteurs, le temps que le courant met pour atteindre sa valeur maximum *dépend de la résistance électrique du circuit, de sa capacité électro-statique et de son coefficient de self-induction.*

Les courants téléphoniques sont ondulatoires comme les vibrations qui les déterminent, ces ondes se transmettront avec d'autant plus d'intensité et de netteté, que la résistance électrique sera plus faible, la capacité électro-statique plus petite et que la self-induction se fera moins sentir.

Les lignes aériennes, les câbles souterrains et sous-marins se comportent comme des condensateurs dont l'une des armatures serait le fil conducteur et l'autre la terre. La capacité des lignes aériennes est de beaucoup plus petite que celle des autres systèmes, elles sont plus favorables aux communications téléphoniques.

La self-induction dépend beaucoup de la matière dont le conducteur est formé; ainsi elle est beaucoup plus faible pour les métaux non magnétiques comme le bronze, le cuivre, que pour le fil de fer. Avec ce dernier métal, la création du champ magnétique produit par le courant et sa disparition sont retardés par l'aimantation et la désaimantation du conducteur; il en résulte que les ondes électriques se transmettent comme les ondes que l'on produit en agitant un milieu visqueux.

Les communications téléphoniques cessent d'être possibles à des distances bien plus courtes avec les lignes en fil de fer qu'avec celles en cuivre ou en bronze; en outre, avec les conducteurs non magnétiques, les sons sont transmis d'une manière plus claire.

Aussi on a complètement abandonné les fils de fer et d'acier dans la construction des réseaux téléphoniques.

337. **Induction télégraphique et téléphonique.** — Lorsqu'un fil téléphonique est placé sur une certaine longueur parallèlement à un autre fil téléphonique ou télégraphique, les courants qui parcourent ces fils étant essentiellement variables, produisent des courants d'inductions sur les conducteurs parallèles. Ces courants induits ne sont pas assez intenses pour apporter une entrave quelconque aux appareils télégraphiques, mais ils n'en est pas de même pour les postes téléphoniques.

Lorsqu'un fil, servant à la transmission de la parole,

est placé parallèlement à un fil télégraphique, le téléphone étant le galvanoscope le plus sensible que l'on connaisse, est influencé par les courants d'induction déterminés par la correspondance télégraphique et toute communication devient impossible par le premier conducteur.

338. **Influence de la terre sur les communications téléphoniques et télégraphiques.** — La communication des lignes télégraphiques avec le sol s'établit généralement en immergeant une plaque de zinc dans l'eau d'un puits, ou bien en l'enfouissant dans un sol continuellement humide.

Nous avons dit (204) que tous les points du sol se trouvent au même potentiel, mais il arrive quelquefois que par suite de perturbations électriques s'étendant sur une surface importante de la terre, les différents points de celle-ci ne se trouvent plus au même potentiel et que les lignes télégraphiques sont parcourues par des courants permanents qui entravent les communications quelquefois pendant des journées entières ; ces accidents assez rares sont intimement liés aux aurores boréales.

Dans la pratique il n'y a pas lieu de tenir compte de ces perturbations.

Il y a une autre cause de désagrément qui provient de l'emploi des terres : les plaques dont nous avons parlé plus haut se trouvent généralement baignées dans des eaux renfermant des matières de nature différente, de sorte que la plaque de terre plus ou moins attaquée devient le siège d'une force électromotrice quelquefois assez élevée. Les courants dus aux plaques de terre donnent souvent lieu à des bruits très désagréables dans les appareils téléphoniques.

339. **Suppression du retour par la terre pour les communica-**

tions téléphoniques. — Les inconvénients de l'emploi du retour par la terre, insignifiants pour les communications télégraphiques, acquièrent une importance tellement grande lorsqu'il s'agit de lignes téléphoniques que l'on renonce à l'avantage du fil unique et que l'on fait usage d'un fil de retour, ce qui double le prix d'installation de la ligne ainsi que sa résistance électrique.

L'emploi du fil de retour a en outre pour avantage de supprimer en grande partie les effets nuisibles de l'induction téléphonique et télégraphique, les effets d'induction se produisant dans le même sens sur le fil d'aller et sur celui de retour, ces effets s'annulent réciproquement.

Si nous considérons une ligne téléphonique à double fil, placée au milieu d'autres conducteurs soit télégraphiques soit téléphoniques, il est évident que si la distance de chacun des deux fils considérés à tous les autres était la même les effets d'induction sur les deux premiers se détruiraient entièrement. On n'arriverait à ce résultat que si les deux fils de la ligne téléphonique étaient enroulés en hélice l'un autour de l'autre.

C'est ce procédé que l'on emploie pour la construction des câbles aériens et souterrains servant aux transmissions de la parole.

Lorsqu'il s'agit de lignes aériennes, on emploie un arrangement spécial des conducteurs qui consiste à faire occuper successivement par chacun d'eux toutes les positions par rapport aux autres. De cette façon on arrive à équilibrer suffisamment les effets d'induction pour qu'ils ne gênent plus les communications téléphoniques (1).

(1) Voir : Les circuits téléphoniques à longue distance, par M. J. Banneux, ingénieur en chef, directeur des Télégraphes belges. *Bulletin de la Société belge d'électriciens.*

C'est ce moyen qui est employé sur les lignes téléphoniques de Bruxelles à Paris, Paris Marseille, etc.

340. **Système anti-inducteur de Van Rysselberghe.** — M. Van Rysselberghe a résolu la question d'une façon entièrement différente : au lieu de chercher à annuler les effets de l'induction télégraphique dans la ligne téléphonique, il emploie une disposition d'appareils empêchant l'induction télégraphique de produire ses effets nuisibles sur les communications téléphoniques.

Si nous considérons une ligne télégraphique L_1 desser-

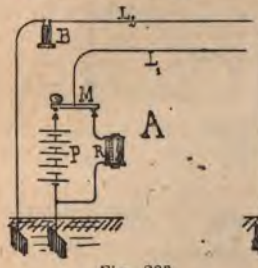


Fig. 283.

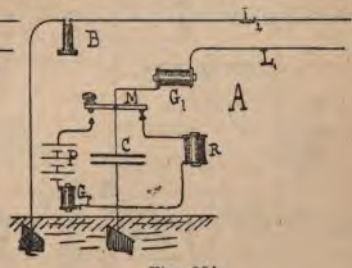


Fig. 284.

vie par un poste Morse A (fig. 283) et une ligne téléphonique L_2 qui lui est parallèle, chaque fois que l'on enverra un courant sur L_1, il se produira dans L_2 un courant induit inverse à la fermeture et un courant direct, lors de l'ouverture du circuit primaire.

A chaque signal transmis sur L_1, la membrane du téléphone B sera attirée violemment deux fois ; dans ces conditions toute conversation est impossible. Si au lieu d'avoir une émission brusque de courant, nous faisons varier graduellement son intensité depuis zéro jusqu'à I, l'induction se produira encore, mais la force électromotrice induite variant proportionnellement à

l'intensité du courant primaire, *la membrane du téléphone sera attirée lentement et aucun son ne sera perçu dans le téléphone B* (fig. 283). *Pour arriver à ce résultat, il faut donc graduer les émissions du courant.*

Voici le dispositif employé dans ce but par M. Van Rysselberghe : on intercale deux électro-aimants G_p et G_l ayant chacun 500 ohms de résistance, sur le fil de pile et sur la ligne en outre un condensateur C de 2 microfarads de capacité est placé en dérivation vers la terre. Les extra-courants de fermeture et d'ouverture qui se produisent dans les bobines G_p et G_l empêchent le cou-

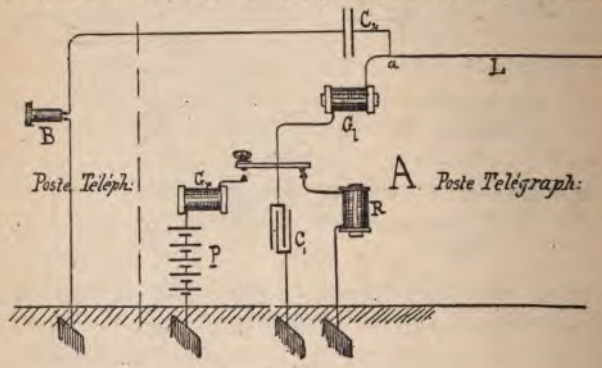


Fig. 285.

rant d'arriver immédiatement à sa valeur maximum lors de la fermeture et ils prolongent sa durée lors de l'ouverture (fig. 284).

Le condensateur C augmente la self-induction de la ligne et contribue au même but. Les deux bobines G_p et G_l appelées respectivement *graduateurs de pile et de ligne avec le condensateur C, constituent les appareils anti-inducteurs d'un poste télégraphique.*

341. **Système de télégraphie et de téléphonie simultanées de Van Rysselberghe.** — Après avoir rendu les courants télégraphiques sans action sur le téléphone, M. Van Rysselberghe a imaginé de se servir des mêmes conducteurs pour servir à la fois aux deux genres de communication.

Soit un poste télégraphique A, muni des appareils anti-inducteurs que nous venons de décrire (fig. 286), si au

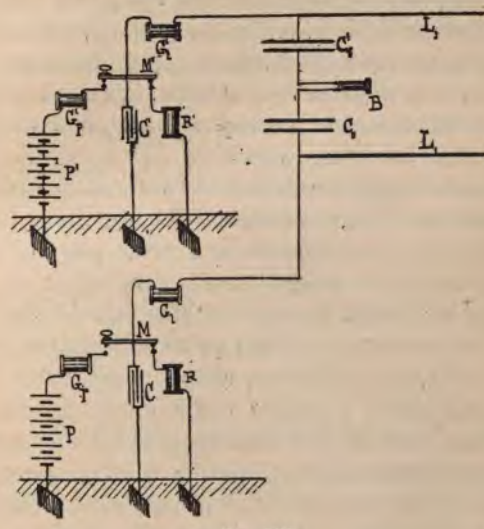


Fig. 286.

point *a*, on place en dérivation un conducteur *a* B dans lequel sont intercalés un poste téléphonique B et un condensateur C_2 de 0,5 de microfarad de capacité; pour les raisons que nous avons indiquées tout à l'heure les courants télégraphiques ne seront pas perçus dans le téléphone B, bien que celui-ci soit traversé par les cou-

rants de charge et de décharge condensateur C_2 à chaque émission de courant dans L. D'autre part la capacité de C_2 est trop petite pour que ces courants de charge et de décharge influent sur la transmission télégraphique. Si la ligne L est employée pour la communication téléphonique, les courants en arrivant en *a* se bifurquent également, mais la partie qui traverse le poste A est faible à cause de sa résistance et de son grand coefficient de self-induction, la plus grande partie prend donc le chemin *ab*, les courants de charge et de décharge de C_2 produits par la transmission téléphonique étant suffisants pour le fonctionnement des appareils téléphoniques. Il en résulte que les deux genres de correspondance sont absolument indépendants l'un de l'autre et que la même ligne peut servir simultanément pour les deux. Le condensateur C_2 appelé *séparateur* a pour effet de rendre indépendants les deux systèmes de communication.

La disposition que nous venons d'indiquer aurait pour effet de ne permettre d'utiliser qu'un seul fil dans chaque ligne pour la correspondance téléphonique, parce que si l'on voulait établir plusieurs communications dans ces conditions, les effets de l'induction téléphonique seraient tels que l'on entendrait par tous les fils la conversation transmise par l'un quelconque d'entre eux. Il faut donc employer deux fils par transmission téléphonique ce que l'on peut faire en adoptant la disposition suivante : (fig. 286) A_1 et A_2 sont deux postes télégraphiques anti-inductés utilisant respectivement les fils L_1 et L_2, le poste téléphonique B est placé en dérivation entre les deux lignes par l'intermédiaire de deux séparateurs C_1 et C_2, ayant chacun 0.5 de microfarad de capacité. Les courants de charge et de décharge de ces condensateurs,

sont insuffisants pour produire le mélange des communications télégraphiques, mais les courants téléphoniques

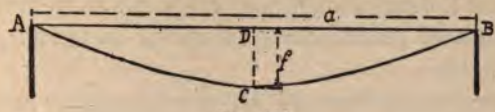


Fig. 287.

produisent des charges et des décharges suffisantes pour que la conversation se transmette parfaitement (1).

342. **Principes régissant l'établissement des lignes aériennes télégraphiques et téléphoniques.** — On sait que si l'on tend un fil métallique entre deux points A et B (fig. 287) situés au même niveau, le fil ABC n'est jamais horizontal. On appelle *portée* la distance a mètres entre les deux points d'appui, et la distance DC dont le point le plus bas se trouve au-dessus de l'horizon s'appelle la *flèche*. Appelons p le poids du fil par mètre courant, et T sa tension en kilogrammes. On démontre par le calcul que ces différents éléments sont réunis par la formule

$$f = \frac{a^2 p}{8T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(A)}.$$

On peut voir immédiatement d'après cette formule que les éléments de la pose d'une ligne aérienne dépendent uniquement de la nature du fil et non pas de son diamètre; en effet, si s est la section et δ la densité du conducteur, et t la tension par unité de surface, on a :

$$p = s\delta \text{ et } T = st \quad \text{donc} \qquad f = \frac{a^2\delta}{8t} \ldots\ldots \text{(B)}.$$

formule dans laquelle le diamètre n'intervient pas.

Nous allons donc faire nos calculs en supposant un conducteur ayant 1 millim. carré de section.

(1) Voir le traité de M. Buels : *Télégraphie et téléphonie simultanées.*

Dans la pratique, on connaît généralement les éléments suivants : la portée, le poids du conducteur par mètre courant et la tension qu'il peut supporter en toute sécurité, on admet généralement 1/4 ou 1/5 de la charge de rupture totale.

Au moyen de la formule (A), on peut calculer la flèche à donner pour les différentes portées, ou bien étant donnée la flèche on peut calculer la portée maximum à laquelle on peut aller avec le fil dont on dispose.

343. **Application de la formule.** — Le fil de fer a une densité de 7.8 et une résistance à la rupture t de 35 kilog. par millimètre carré, p par mètre courant pour 1 millim. carré de section = 7.8 gr.

Pour le bronze téléphonique $\delta = 8.9$ $t = 75$ kilogr. $p = 8.9$ gr.

Pour le bronze télégraphique $\delta = 8.9$ $t = 45$ kilogr. $p = 8.9$ gr.

I. — Soit une portée a de 100 mètres, quelle flèche doit-on donner à chacun des genres de conducteurs en admettant une charge permanente de $\frac{1}{4}$ de la charge de rupture?

1° fil de fer . . . . . $f = \dfrac{10000 \times 0{,}0078}{8 \times \frac{35}{4}} = 1^{m}111$

2° fil de bronze télégr. $f = \dfrac{10000 \times 0{,}0089}{8 \times \frac{45}{4}} = 0^{m}999$

3° » téléphon. $f = \dfrac{10000 \times 0{,}0089}{8 \times \frac{75}{4}} = 0^{m}593.$

II. — En admettant une flèche de 1 mètre, quelle portée pourra-t-on donner à chacun des trois genres de conducteurs pour ne pas dépasser une tension égale à $\frac{1}{4}$ de la charge de rupture?

$$a = \sqrt{\frac{8fT}{p}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(C)}.$$

1° fil de fer . . . . . $a = \sqrt{\frac{8.1.\frac{35}{4}}{0,0078}} = 95$ mètres

2° bronze télégraphique $a = \sqrt{\frac{8.1.\frac{45}{4}}{0,0089}} = 100$ mètres

3° bronze téléphonique $a = \sqrt{\frac{8.1.\frac{75}{4}}{0,0089}} = 129$ mètres.

344. — *Quand les points d'appui* A *et* B *ne sont pas dans le même plan horizontal*, le point le plus bas D du fil ne se trouve pas au milieu de AB, mais au milieu d'une longueur AC plus grande que a, la flèche f et la tension du fil au point le plus bas sont les mêmes que si les points d'appui étaient A et C (fig. 289).

Dans ce cas le calcul devient plus difficile, aussi le

Fig. 288.

moyen pratique le plus convenable, pour installer les lignes aériennes sans dépasser la tension admissible, c'est de les tendre en employant un dynamomètre qui donne la charge permanente à laquelle le fil sera soumis.

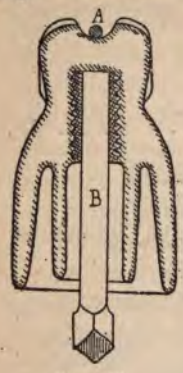


Fig. 289.

345. **Longueur du fil.** — La longueur réelle l du fil entre a et b est plus grande que la distance a, elle est donnée par la formule

$$l = a + \frac{a^3 p^2}{24 T^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (D).$$

et si nous éliminons T et p entre A et D, nous avons

$$l = a + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{a} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (F).$$

Prenons le cas d'un fil téléphonique en bronze de 200 mètres de portée,

$$f = \frac{4.10^4.0,0089}{\frac{8.75}{4}} = 2^m37.$$

$$l = 200 + \frac{8}{3} \times \frac{2,37}{200} = 200,075 \text{ mètres.}$$

La différence de longueur est donc insignifiante.

346. **Influence de la température.** — Le conducteur se dilate ou se contracte suivant que la température s'élève ou s'abaisse au-dessus ou au-dessous de la température à laquelle la pose s'est effectuée. Ces variations de longueur sont environ trois fois plus considérables pour les fils de bronze ou de cuivre que pour les fils de fer.

Une diminution de la longueur du fil a pour effet de diminuer la flèche et d'augmenter la tension, lorsque

les portées sont courtes la flèche est petite, et la moindre diminution de longueur du fil peut amener sa rupture ; aussi, surtout pour les petites portées, il faut tenir compte de cette circonstance, principalement quand les lignes sont posées en été.

C'est parce que ce point est trop souvent négligé que tant de fils se rompent lors des premières gelées ; autrefois on détendait les fils au commencement de l'hiver, mais cette pratique onéreuse a été abandonnée parce que elle est inutile quand les lignes sont bien posées.

347. **Isolateurs.** — On emploie aujourd'hui d'une façon presque générale les isolateurs en porcelaine, on a essayé le verre, mais il est trop hygrométrique et ne convient pas en Europe dont le climat est trop humide. Les isolateurs en verre sont beaucoup employés aux États-Unis d'Amérique dont le climat est en général plus sec que le nôtre.

Pour que l'isolement reste suffisant, même en temps humide, il faut que la distance que le courant doit parcourir pour arriver du conducteur A au support B métallique soit aussi grande que possible, il faut donc donner un grand développement à la surface de l'isolateur, c'est pourquoi on lui donne généralement la forme d'une cloche double (fig. 289). Il faut que la matière de l'isolateur même soit assez isolante pour que le courant ne se transmette pas à travers la masse.

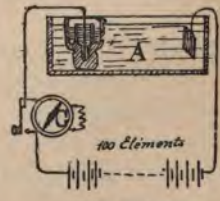


Fig. 290.

348. **Essai des Isolateurs.** — Pour s'assurer que la masse des isolateurs n'est pas conductrice, on renverse les cloches dans une cuve A remplie d'eau, on verse de l'eau

également à l'intérieur des cloches jusqu'à 1/2 centimètre du bord (fig. 290), on met l'eau de la cuve en communication avec l'un des pôles d'une pile P de 100 éléments et l'autre pôle avec l'intérieur des cloches, un galvanomètre sensible G est placé dans le circuit. On doit bien sécher les bords des isolateurs, le galvanomètre ne peut accuser aucune dérivation.

Avant de procéder aux expériences, on laisse les cloches pendant 24 heures dans l'eau parce qu'elle pénètre dans les fentes imperceptibles qui pourraient exister. On peut mettre un grand nombre de pièces à la fois dans la cuve.

Pour les lignes un peu longues on ne peut pas admettre d'isolateur ayant moins de 500 megohms de résistance.

CHAPITRE XXIV

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE. PARATONNERRES (1)

349. **Électricité atmosphérique. — Paratonnerre.** — On sait que c'est Franklin qui a établi expérimentalement l'identité de la foudre et de l'électricité. Après avoir démontré ce fait d'une façon irréfutable, il songea à appliquer le pouvoir des pointes à la préservation des édifices.

Puisque la foudre n'est autre chose qu'une décharge disruptive d'électricité qui se produit entre les nuages et le sol, pour préserver les édifices des effets désastreux de ces décharges, il faut : *ou bien empêcher la différence de potentiel entre le sol et les nuages de devenir assez élevée pour que la décharge se produise; ou bien si l'on n'a pas pu éviter la déflagration, ménager à l'électricité des passages qu'elle choisira de préférence et qui la détourneront des objets à préserver.*

Le paratonnerre a donc un double rôle à remplir; il est à la fois *préventif* et *préservatif*.

350. **Paratonnerre à haute tige.** — Les premiers paratonnerres dont on a fait usage consistaient simplement en une haute tige métallique placée au sommet du bâtiment à protéger. Cette tige métallique était mise en communication intime avec le sol par un conducteur métallique de fort diamètre généralement en fer et souvent en cuivre lorsque l'on ne regardait pas à la dépense.

(1) *De la foudre et des moyens d'en prévenir les dangers*, par R. Courtoy, professeur de physique, et R. Boulvin, ingénieur des télégraphes. Bruxelles, 1889.

Lorsque le potentiel de la terre s'élève, l'électricité s'écoule par la pointe et va se recombiner avec celle du nuage. Si l'action préventive est insuffisante et si la neutralisation complète n'a pas le temps de se produire, la décharge suit le bon conducteur qui lui est offert par le paratonnerre de préférence à toute autre voie.

Malheureusement, une pointe ne peut laisser écouler qu'une quantité limitée d'électricité et l'action préventive des paratonnerres à tige unique est loin d'être efficace; quant à l'action préservatrice on admettait à l'origine qu'elle s'étendait à une zône dont le rayon était égal à deux fois la hauteur du sommet de la tige au-dessus du sol, mais des accidents survenus, ont fait restreindre successivement la zône de protection et aujourd'hui, d'après M. Preece, électricien en chef du Post-Office, la zône de protection d'un paratonnerre AB (fig. 291) est

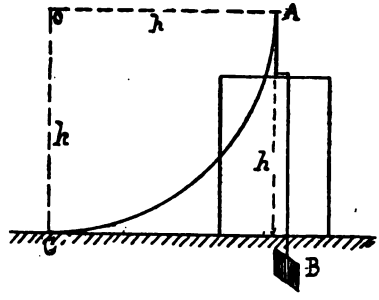


Fig. 291.

limitée par le solide de révolution obtenu en faisant tourner autour de AD le quart du cercle AC, tracé du point O comme centre arc, un rayon égal à la hauteur *h*.

Dans ces conditions, si nous supposons un bâtiment

de 40 mètres de hauteur, surmonté d'une tige métallique de 10 mètres, pour que l'édifice soit complètement protégé, il faudrait qu'il y eut une tige de paratonnerre tous les 5 mètres environ.

Il est inutile d'insister sur l'impossibilité d'établir un pareil mode de protection.

351. **Paratonnerre Melsens à pointes et à conducteurs multiples.** — En 1863, l'Hôtel de Ville de Bruxelles ayant été frappé par la foudre, l'administration communale pria l'Académie des sciences de Belgique de donner son avis sur des projets de paratonnerres qui lui avaient été soumis. Les membres de la commission nommée à ce propos ne purent se mettre d'accord et l'Académie ne put se prononcer.

C'est alors que Melsens ayant étudié la question en sa qualité de membre de la susdite commission, présenta un projet dont les dispositions s'écartaient absolument des idées orthodoxes sur la matière, suivant l'heureuse expression du professeur Lodge. Et en 1865, ce projet fut mis à exécution, l'auteur en ayant pris personnellement la responsabilité.

Voici quelles étaient les dispositions principales : Melsens n'admettait pas l'existense d'une zone de protection, d'après lui il n'existait qu'un seul moyen de préservation, c'était d'entourer tout l'édifice d'un réseau métallique aussi serré que possible, de façon à se rapprocher autant que possible des conditions de l'expérience de la cage de Faraday, qui démontre (15) que l'intérieur d'une cage métallique même chargée à un haut potentiel ne peut être le siège d'aucun phénomène électrique.

Pour réaliser cette cage, au lieu d'employer de gros conducteurs, il faisait usage d'un grand nombre de fils

de fer de 4 à 5 millim. de diamètre. En outre, il mettait sa cage en communication intime avec la terre en autant de points que possible.

Melsens avait démontré expérimentalement que quand on offre à la décharge d'une batterie de Leide, un grand nombre de chemins de résistances électriques très différentes, la décharge se divise entre tous les conducteurs, même quand les uns ont une résistance pratiquement nulle et les autres une résistance extrêmement grande ; il démontra que la loi d'Ohm n'était pas du tout applicable aux décharges instantanées.

Le but réalisé dans le paratonnerre Melsens est donc de mettre l'édifice à l'abri des influences électriques extérieures en l'entourant d'une cage métallique à mailles aussi serrées que possible, et de présenter ainsi aux décharges un grand nombre de chemins, de façon à la subdiviser en un grand nombre d'autres inoffensives.

Melsens démontra également par l'expérience, qu'un conducteur en fer laisse écouler une décharge instantanée avec la même facilité qu'une tige de cuivre, aussi n'a-t-il cessé de préconiser l'emploi du fil de fer galvanisé qui se conserve très bien à l'air, coûte peu de chose et en outre, disait-il, présente l'avantage de ne pas tenter les voleurs.

Au point de vue de l'action préventive, partant de ce fait qu'une seule pointe met un temps déterminé pour évacuer une certaine quantité d'électricité, son action préventive est très limitée, et si le potentiel s'élève rapidement, la décharge se produit malgré le paratonnerre ; aussi, au lieu de hautes tiges présentant une pointe unique, on fait usage dans le système Melsens d'aigrettes composées de 5 ou 6 tiges divergentes et de 40 à 50 cen-

tim. de long. Il est bien inutile, en effet, d'employer les tiges de plusieurs mètres de longueur, qu'on ne pourra jamais faire assez hautes pour que leur longueur forme une fraction sensible du chemin parcouru par la décharge foudroyante qui se produit a travers des centaines sinon des milliers de mètres de distance.

Depuis son apparition, le système à pointes et à conducteurs multiples a fait l'objet de vives controverses.

Dans le courant de 1888, le professeur Lodge, de l'Université de Liverpool, a institué une série d'expériences qui sont venues confirmer d'une façon lumineuse les vues de Melsens.

Voici l'opinion de Lodge au sujet du paratonnerre de l'Hôtel de Ville de Bruxelles : « *L'édifice qui est peut-être le mieux protégé du monde, c'est l'Hôtel de Ville de Bruxelles.*

» *Le système entier employé pour cet édifice est excellent et théoriquement parfait, pour autant que je le connaisse dans tous ses détails ; mais il n'est pas bon marché et quelques personnes ont émis l'idée qu'il n'est peut-être pas artistique.* »

Il est étonnant de voir se reproduire les mêmes critiques au sujet du paratonnerre Melsens, par tous les savants étrangers qui s'en sont occupés.

Ces critiques ont cependant été réfutées dès 1878 par une note adressée à l'Académie royale des sciences et dans le *Rapport de la Commission belge à l'Exposition de Paris en 1881*. Il résulte de la comparaison établie entre les édifices munis de paratonnerres à hautes tiges et d'autres pourvus de paratonnerres à conducteurs et à pointes multiples, que le prix de ces derniers est, en moyenne de fr 0.66 par mètre carré de bâtiment pro-

tégé, tandis que pour les premiers il est de fr. 4.66, soit 7 fois plus, et cela pour des constructions d'importance comparable.

Au point de vue artistique, nous pensons la critique encore plus mal fondée, car il n'y a rien de moins architectural, à notre avis, qu'une tige de paratonnerre, tandis que les conducteurs minces et les aigrettes employés par Melsens sont à peine visibles.

352. **Communication avec le sol.** — Il est de la plus haute importance que la communication du paratonnerre avec le sol soit établie d'une façon intime, afin de ne pas entraver les décharges.

A ce point de vue, la mesure de la résistance électrique est une indication utile mais nullement suffisante, il n'y a qu'une seule vérification efficace, c'est celle qui est faite *de visu par un homme compétent*.

Ces vérifications doivent se faire tous les ans avant la période des orages et chaque fois que le paratonnerre a été frappé par la foudre.

FIN

TABLE ALPHABÉTIQUE

Les nos renvoient aux paragraphes

Accouplement de plusieurs condensateurs 35
Accumulateurs 286
— Calcul d'une batterie . 294
— Capacité 293
— Charge et décharge. . 292
— Conduite d'une batterie 295
— Différence avec les condensateurs 287
— Faure 289
— Formation. 288
— Force électromotrice et résistance intérieure. 290, 291
— Rendement 293
Action directrice de la terre sur un aimant . . 57
Action d'un solénoide sur un barreau aimanté . . 92
— sur un morceau de fer doux 94
Action réciproque de deux aimants 56
— de deux courants . . 87
Aimantation par influence. 59
Aimant compensateur . . 165
Aimant creux. Comparaison avec un solénoïde . 93
Aimant naturel 53
Aimants artificiels . . . 53
— fabrication. 99
Allumeur de Clarke . . . 45
Amalgamation du zinc. . 126
Ampère (Règle d') . . . 85
— (Expériences d') . . . 88
Ampèremètre Ayrton et Perry 182
— de Kohlrausch . . . 181
— de Hummel 183
— de W. Thomson . . . 180
Ampèremètres (Influence de la température sur les) 210
Anneau Gramme. . . . 230
Anode 273
Appareil télégraphique à cadran 321
— — Hughes. 322
— — Morse 320
Applications du calcul de la force électromotrice . 277
— de la loi de Faraday . 120
— — de Joule 119
— des unités 117
Arago (Expérience d') . . 224
Arc voltaïque 259
— — Propriétés. . . . 260
— — Emploi des courants alternatifs 261
— — Intensité lumineuse dans différentes directions 262

Armature des aimants . . 69

Bains simples. Composés. 280, 281
Balais. (Calages des) . . 237
— Déplacement dans les moteurs électriques . . 297
Balances électro-dynamométriques de Sir W. Thomson 186
Belli. (Machine de) . . . 45
Bobine de Rhumkorff . . 307
Bougies Jablochkoff. . . 364
Bouteille de Leyde . . . 34
Boussole des tangentes . 178

Calage des balais . . . 237
Calcul d'une batterie d'accumulateurs 294
Capacité. Définition. . . 27
— des accumulateurs . . 293
— d'un condensateur . . 33
— inductive spécifique . 33
— Unité 118
Caractéristique des machines dynamo-électriques. 238, 239
Cathode. 273
Champ magnétique. Définition 62
— — Intensité 65
— — produit par un courant 84
— — d'un courant circulaire fermé . . . 86
— — des dynamos. . . 253
— — d'un solénoïde . . 91
Charge des accumulateurs. 292
— résiduelle 37
Clamond. Pile thermo-électrique. 162
Clarke. Allumeur à gaz. . 45
Comparaison des machines à frottement et des machines à induction . . 48
Comparaison d'un solénoïde et d'un aimant creux 95
Condensateur d'OEpinus . 34
Condensateur employés en télégraphie 36
Condensation 32
Conditions du maximum de rendement des piles. 157
Conductibilité électrique . 74
— des fils (Mesure de la) . 213
— spécifique 201
Consommation des constituants d'une pile . . . 158
Corps bons conducteurs et mauvais conducteurs . 2
Corps paramagnétiques et diamagnétiques . . . 60
Coulomb. (Lois de) . . . 12
Courant. (Action chimique du) 81
— — calorifique . . . 82
— de Foucault 225
— dérivés 77, 78
Courant électrique . . . 71
Courants. (Propriétés générales des). 80

Davy. (Expérience de) . . 259
Décharge des accumulateurs 292
Décharges conductives et disruptives 49
Décomposition des sels métalliques 278
Deprez d'Arsonval. Galvanomètre 170
Détermination de la valeur industrielle d'une pile . 210
Différence du potentiel. . 22
— — (Mesure de la) . . 205
Différents systèmes de piles 133

Distribution de l'énergie électrique 310
— — en dérivation . . 312
— — en tension. . . . 311
— — par conducteurs multiples 315
— — par transformateurs 313
— — en tension et dérivation combinées . 314

Ecran métallique . . . 30
— magnétique 70
Effet du fer doux sur l'intensité d'un champ magnétique. 96
Effets chimiques des décharges 51
— physiologiques . . . 52
Electricité atmosphérique. 349
— définition 1
— Résineuse. Vitrée . . 5
— produite par les actions chimiques 9
— — par la chaleur et les actions mécaniques . . 10
Electricité (L') à l'état du repos se porte exclusivement à la surface des conducteurs. 14
Electrification. 37
Electrisation par conduction 4
— par influence 28
Electro-aimant 93
Electro-dynamomètre de Siemens 185

Fabrication des aimants artificiels 99
Faraday. (Chambre de). . 15
— (Expérience du filet de) 14
— (Lois de) 81
— (Machine disque de) . 227
— (Règle de) 85
Ferranti. (Dynamo à courants alternatifs) . . . 250
Force électromotrice. (Calcul de la). . . . 276, 277

Distribution de l'énergie par accumulateurs . . 316
Diplex. (Transmissions télégraphiques) 327
Duplex. (Transmissions télégraphiques) 326
Durée des accumulateurs . 292
Durée des lampes à incandescence. 236

Electromagnétisme . . . 84
Electromètre condensateur 38
Electrophore de Volta . . 40
Electroscope à feuilles d'or 31
Electrotypie 279
Energie chimique et calorifique dépensées dans une pile 123
Énergie électrique. (Distribution de l') 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316
Énergie produite par une pile 131
Équivalent électro-chimique 275
Étalons secondaires de résistance 188
Établissement des lignes aériennes, principes . . 342
Excitation du champ magnétique des dynamos 235, 236
Expériences d'Ampère . . 88
— d'Arago. 224
— de Davy. 259
Extra courant. 223

Force électromotrice. (Définition de la. . . . 22, 72
— — de polarisation . . 274
— — des accumulateurs 290, 291
— — due aux actions chimiques 122
— — des piles (mesure de la) 205, 206
— — (Unité de) . . . 115
— — d'une pile à circuit

ouvert, à circuit fermé . 150

Galvanomètre. 163
— à haute et à faible résistance, conditions d'emploi. 164
— aimant compensateur . 165
— de Nobili 167
— Deprez d'Arsonval . . 170
— différentiel. 169
— de W. Thomson . . . 168

Hughes. Appareil télégraphique 322
— Microphone 330
— Théorie du magnétisme 68

Incandescence. (Lampes à) 253, 254
Inconvénients des piles à acide nitrique 147
Inducteur des dynamos . 233
Induction. Action des écrans métalliques . . 212
— Electro-magnétique. . 216
— Electro-statique . . . 28
— par les aimants . 213, 214
— par les courants . . . 215
— Phénomènes fondamentaux 211
— propre (Self-Induction) 223
— télégraphique et téléphonique 337
Induit Gramme . . 228, 229

Jablochkoff. (Bougies). . 264

Kittler. Méthode pour la mesure des intensités . 187
Kirchhoff. (Loi de) . . . 79

Laitonisage 283
Lampes à incandescence 253, 254
— — Durée 256
— — Intensité dans diverses directions. . . 258

Foucault. (Courants de) . 225

Galvanomètre. (Mesure de la résistance d'un) . 206
Galvanoplastie . . 278, 279
Gaulard et Gibbs. (Transformateur de) 308
Gramme. Anneau . . . 230
— Induit 228
— Lampe à arc 269
— Machine à courants alternatifs 246

Hummel. (Ampèremètre de) 185
Hypothèse sur la nature de l'électricité 6

Induit Siemens. . . 228, 231
— en tambour 231
Influence. (Aimantation par) 59
— (Electrisation par) . . 28
Influence de la forme des corps sur la distribution de l'électricité 17
Intensité d'un champ magnétique. 65
— d'un courant . . . 72, 75
— du courant produit par une pile 129
— (Unité d') 113
Isolants. 3
Isolateurs 347
— (Essai des). 348

Joule. (Loi de) 82

Kohlrausch. (Ampèremètre de). 181
— (Pont de) 199

Lampes à incandescence. Résistance du filament . 255
— — (Rendement lumineux des) 256
Lampes à arc à courant

continu . 265, 266, 267, 268 269, 270
Lampes différentielles. 267, 268
— Foucault Duboscq . . 266
— Jaspar 266
— Principaux types . . 269
— Rendement lumineux . 271
— Résistance des charbons 272
Lecture des déviations du galvanomètre au moyen du miroir 173
Leyde. (Bouteille de) . . 34
Lignes aériennes. (Etablissement des) 342, 343, 344, 345 346

Machine de Belli. . . . 43
— de Holtz 46
— disque de Faraday . . 227
— Ferranti 250
— Gramme 276
— Siemens 247
— Westinghouse. . . . 249
— Zypernowsky 248
Machines dynamo-électriques 226
— à courant continu . . 226
— à courants alternatifs . 245
— — (Couplage des) . . 251
— caractéristique. . 238, 239
— (Considérations générales sur les) 241
— à pôles multiples . . 254
— rendement. 243
Machines à frottement . . 40
— à induction 42
Magnétisme. Théorie de Hughes 68
Mance. (Méthode de) . . 174
Melloni et Nobili. (Pile thermo-électrique) . . 161
Mesure des faibles résistances 200
— des forces électromotrices 205
— des intensités. . . . 175
— par l'action chimique du courant . 176, 177, 187
Ligne téléphonique. (Conditions que doit remplir une) 336
Lignes de force 65
Lois de Coulomb. . . . 12
Loi de Joule 82
— — Applications . . . 119
Lois de Kirchhoff . . . 79
Loi des attractions et des répulsions magnétiques 61
Loi de la variation de la résistance avec la température 202

Mesure du courant par l'aiguille aimantée . . . 178
— de l'action d'un solénoïde sur un morceau de fer doux 181
— du courant par les actions réciproques des courants. 184
— de l'isolement. . . . 195
— de la résistance d'une pile 209
— des résistances . . . 188
— — par la méthode de substitution 191
— — des déviations proportionnelles 192
— — par le galvanomètre différentiel 194
— par la méthode du pont de Wheatstone. . . . 195
Microphone d'Ader . . . 333
— de Blake 332
— d'Edison 331
— de Hughes. 330
— — (Emploi de la bobine d'induction dans le). 334
Moment magnétique . . 67
Moteurs électriques. . . 296
— — déplacement des balais 297
— — rendement. . 299, 300
Moyen de soustraire un

conducteur aux effets d'induction statique . . 30

Nickelage 284

Oepinus (Condensateur d') 34
Oerstedt (Expérience d') . 84

Parallaxe (Erreur de lecture due à la) 172
Paratonnerre 349
— à haute tige 350
— Melsens 351
Parleur 323
Perméabilité magnétique. 97
Pendule électrique . . . 5
Pile Bunzen, 146; au chlore, 148; Calaud, 152; Daniell et variantes, 149, 150; Grove, 145; Lalande et Chaperon, 143; Leclanché, 139, 140; Marié-Davy, 153; Mendinger, 150; Minotto, 151: Poggendorf au bichromate de potassium, 137; Smée, 136; Volta, 134; Warnon, 141; Warren De la Rue. . . 138
Piles (Accouplement des) . 156
— à un seul liquide . . 134
— Conditions de rendement maximum . . . 157
— à deux liquides . . . 143
— à dépolarisant formé par une dissolution saline . 149
— Etalons 154, 155
— Qualités qu'elles doivent présenter 132
Piles (Résistance intérieure des) 128
— sèches 142
— secondaires 160
— simples sans dépolarisant 134
— — à dépolarisant . . 135
— thermo-électriques . . 161
Polarisation 124
— (Force électromotrice de) 274
— Moyens de l'empêcher . 123
Pôles d'un aimant . . . 55
— conséquents 98
Pont de Wheatstone. . . 195
— — forme ordinaire . . 196
— — modèle Post Office . 197
— — à fil divisé. . . . 198
— de Kohlrauch. . . . 199
Poste téléphonique . . . 335
Potentiel (Différence de) . 22
— — unité 115
— électrique 23
Pouvoir des pointes. . . 18
Problèmes sur les piles. . 159
— sur les résistances . . 203
Propriétés générales du courant 80
Puissance 110

Quadruplex. Transmissions télégraphiques. . 327
Qualités que doivent présenter les piles. . . . 132
Quantité d'électricité, définition. 13
— — (unité de) 114

Ramsden (Machine de). . 41
Réception à l'ouïe . . . 323
Réducteurs pour galvanomètres 174
Règles d'Ampère et de Faraday 85
Relais 323
Rendement des accumula-

teurs 293
Rendement des machines dynamo-électriques . . 245
— des moteurs électriques 298, 300
— lumineux des lampes à arc. 271
— — à incandescence 256, 257
Régime de charge et de décharge des accumulateurs 292
Répartition du magnétisme. 55
Replénisher ou rechargeur de Sir W. Thomson . . 44
Représentation du champ magnétique. 66
Résistance électrique . 72, 74
— — de la terre. . . . 204
— intérieure des accumulateurs 290
— — d'une pile. . . . 128
— (Unité de) 116
— Spécifique. 201
— Variation avec la température. 202
Réunion de plusieurs machines à courant continu 244
Rhéostats 188
Rhéostats en décades . . 190
Rhumkorff (Bobine de). . 307

Seebeck (pile thermo-électrique) 161
Self induction. 225
Sels métalliques. Décomposition. 278
Shunts pour galvanomètres 174
Signaux acoustiques . . 325
Solénoïde 90
Siemens (Electro dynamomètre de) 185
— dynamo à courants alternatifs 247
Support isolant de Mascart 3
Systèmes télégraphiques multiples 328
— anti-inducteur de Van Rysselberghe . . 340, 341

Tarage des voltmètres. . 211
Télégraphie. But. . . . 317
—(Fonctionnement des appareils) 318
— (Parties constituantes d'un poste) 317
Téléphone de Bell . . . 329
Téléphonique (Poste) . . 339
Tension (Influence de la) . 304
— (Inconvénients des hautes) 304
Terre. Dans les communications télégraphiques . 316
— — téléphoniques. 338, 339
— (Résistance de la) . . 204
Théorie du magnétisme de Hughes 68
Transformateur à courant continu 309
— de Gaulard et Gibbs. . 308
— (Premiers). 307
— (Principes des) . . . 306
— Zypernowsky. Deri. Blathy 308
Transmission télégraphique. Diplex. 327
— — Duplex. 326
— — Quadruplex . . . 327
Travail 110

Unités absolues, arbitraires (Système d') 102
Unité d'accélération. . . 107
— de capacité 118
— de différence de potentiel ou de force électromotrice 115
Unité de force. 108
— d'intensité de courant . 113
— de longueur et dérivées 103

Unité de quantité. . . . 114
— de pôle. 112
— de résistance 116
— de travail 109
— de vitesse 106
Unités magnétiques et électriques 111

Van Rysselberghe (Système anti-inducteur). . 340
— Télégraphie et téléphonies simultanées . . . 341
Volta (Electrophore de). . 40
— (Pistolet de) 51
— (Pile de) 124
Voltamètre. 81

Watt 119
Westinghouse (Dynamo à courants alternatifs de). 249
Wheatstone (Pont de) . . 195
W. Thompson. (Ampèremètre pour forts courants de). 180

Zipernowsky (Dynamo à courants alternatifs de). 248

Unités mécaniques . . . 105
— pratiques employées en électricité 101
— récapitulation 121
Usages de l'électricité statique 53

Voltmètres. 207
— (Influence de la température sur les indications des) 210
— pour courants alternatifs 208
— (Tarage des) . . 211, 212

W. Thompson. (Balance électro-dynamométrique de). 186
— (Galvanomètre de) . . 168
— (Règle de) 303
— (Replénisher ou rechargeur de) 44

Zipernowsky-Deri-Blathy (Transformateur de) . . 308

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE I

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX

Pages.

Électricité. — Corps bons conducteurs et mauvais conducteurs. — Isolants. — Électrisation par conduction. — Phénomènes d'attraction et de répulsion. — Hypothèse sur la nature de l'électricité. — Électricité produite par les actions chimiques. — Électricité produite par la chaleur et les actions mécaniques. — Loi de Coulomb. — Quantité d'électricité 1-9

CHAPITRE II

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

L'électricité se porte à la surface extérieure des conducteurs. — Chambre de Faraday. — Distribution de l'électricité. — Influence de la forme du conducteur. — Pouvoir des points. 9-15

CHAPITRE III

POTENTIEL — FORCE ÉLECTROMOTRICE — CAPACITÉ

Force électromotrice, définition. — Potentiel, définition. — Capacité 16-25

CHAPITRE IV

ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE — INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE — CONDENSATION

Pages.

Électrisation par influence. — Moyen de soustraire un corps aux effets d'induction. — Écran métallique. — Électroscope à feuilles d'or. — Condensation. — Capacité d'un condensateur. — Capacité inductive spécifique. — Diverses formes de condensateur. — Accouplement de plusieurs condensateurs. — Condensateurs employés en télégraphie et en téléphonie. — Charge résiduelle, électrification. — Électromètre condensateur. 24-36

CHAPITRE V

PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ A HAUTE TENSION

MACHINES ÉLECTRIQUES

Machines à frottement. — Électrophare de Volta. — Machine de Ramsden. — *Machines à induction.* — Fonctionnement. — Machine de Belli. — Replénisher de Sir William Thomson. — Allumeur à gaz de Clarke. — Machine de Holtz et variantes. — Comparaison des machines à frottement et à induction 37-47

CHAPITRE VI

DES EFFETS PRODUITS PAR L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Décharges conductives et décharges disruptives. — Effets chimiques. — Effets physiologiques. — Usages de l'électricité statique 48-50

CHAPITRE VII

MAGNÉTISME

Aimants naturels. — Aimants artificiels. — Répartition du magnétisme dans un barreau aimanté. — Action réci-

Pages.

proque de deux aimants. — Action directrice de la terre. — Système astatique. — Aimantation par influence. — Corps dia et para-magnétiques. — Action réciproque de deux pôles d'aimant. — Unité de pôle. — Champ magnétique. — Lignes de force. — Intensité du champ magnétique. — Représentation du champ magnétique.—Moment magnétique. — Théorie de Hughes. — Armature des aimants. — Ecran magnétique 51-66

CHAPITRE VIII

COURANT ÉLECTRIQUE

Définition. — Force électromotrice. — Résistance. — Intensité du courant. — Loi d'Ohm. — Courants dérivés. — Lois de Kirchoff. — Propriété générales des courants. — Action chimique — Loi de Faraday. — Action calorifique. — Loi de Joule 67-80

CHAPITRE IX

ÉLECTRO MAGNÉTISME

Champ magnétique produit par un courant. — Action sur l'aiguille aimantée. — Règle d'Ampère, de Faraday. — Champ magnétique d'un courant circulaire fermé. — Actions réciproques des courants. — Expérience d'Ampère. Solénoïde. — Champ magnétique produit par un solénoïde. — Action sur un barreau aimanté. — Comparaison d'un solénoïde et d'un aimant creux. — Électro-aimant. — Effet du fer doux sur le champ magnétique d'un solénoïde. — Fabrication des aimants artificiels. — Galvanoscopes et galvanomètres 81-102

CHAPITRE X

UNITÉS PRATIQUES EMPLOYÉES EN ÉLECTRICITÉ

Système d'unités arbitraires. — Système absolu. — Unités de longueur et dérivées. — *Unités mécaniques.* — Unité de force, de vitesse, d'accélération. — Unité de travail. — Puissance. — *Unités magnetiques et électri-*

Pages.

ques, de pôle, d'intensité, de quantité, de différence, de potentiel ou de force électromotrice, de résistance. — Applications. — Unité de capacité. — Watt. — Application de la loi de Faraday. — Récapitulation. . . . 103-124

CHAPITRE XI

DES PILES — PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

Force électromotrice due aux actions chimiques. — Énergie chimique et calorifique dépensée dans une pile. — Polarisation. — Moyen de l'empêcher. — Amalgamation. — Relation entre la force électromotrice, la résistance et les dimensions d'une pile. — Résistance intérieure. — Intensité de courant que peut produire une pile. — Force électromotrice à circuit ouvert et à circuit fermé. — Energie produite par une pile. — Qualités que les piles doivent présenter. — Différents systèmes en usage. — *Piles à un seul liquide.* — Piles sans dépolarisant. — Piles à dépolarisation mécanique, à dépolarisant chimique. — Paggendorf à dépolarisant solide. — Warren De la Rue. — Pile Leclanché et variantes. — Pile Warnon. — Piles sèches. — Pile Lalande et Chaperon. — *Piles à deux liquides*, de Grave, de Bunzen. — Inconvénients. — Piles au chlore. — *Piles à dépolarisant formé par une dissolution saline.* — Pile Daniell. — Meydinger. — Minotto-Callaud. — Marie Davy. — Piles étalon, du post-office, de latinus Clarke. — Accouplement des piles. — Conditions de maximum de rendement. — Consommation des constituants dans une pile. — Problèmes. — Piles secondaires 125-164

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

Pile de Seebeck, de Clermont. 164-166

CHAPITRE XII

GALVANOMÈTRES

[illegible] — Galvanomètre de Nobili. — Galvanomètre Thomson. — Différentiel. —

Pages.

Deprez d'Arsonval. — Erreur de lecture due à la parallaxe. — Échelle à miroir. — Shunts-Réducteurs . . 167-177

CHAPITRE XIII

MESURE DES INTENSITÉS

Différentes méthodes. — Par l'action chimique du courant. — Exemple. — Par l'action sur l'aiguille aimantée. — Boussole des tangentes. — Ampèremètre de Sir William Thomson pour les forts courants. — Mesure de l'intensité par l'action sur un morceau de fer doux. — Ampèremètres de Kohlrausch, de Ayrton et Perry, de Hummel. — Mesure de l'intensité par les actions réciproques des courants. — Électrodynamomètre de Siemens. — Balances électrodynamiques de Sir William Thomson. — Méthode de Kittler 178-192

CHAPITRE XIV

MESURE DES RÉSISTANCES

Étalons de résistance. — Rhéostats. — Rhéostats en décade. — Méthode de substitution. — Méthode des déviations proportionnelles. — Mesure de l'isolement d'un câble. — Méthode du galvanomètre différentiel du pont de Wheatstone. — Forme ordinaire. — Modèle du Post-Office. — Pont à fil divisé. — Pont de Kohlrausch. — Mesure des résistances très faibles. — Méthode de M. Rousseau. — Résistance spécifique des conducteurs. — Conductibilité spécifique. — Loi de variation de la résistance avec la température de conducteur. — Problèmes. — Résistance électrique de la terre 193-213

CHAPITRE XV

MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES ET DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

Mesure des forces électromotrices des piles. — Méthode par opposition, par la boussole des tangentes. — Voltmètres. — Voltmètres pour courants alternatifs. — Influence de la température sur les indications des

Pages.

voltmètres et des ampèremètres. — Tarage des voltmètres 214-223

CHAPITRE XVI

MESURES A FAIRE DANS UN LABORATOIRE INDUSTRIEL

Mesure de la conductibilité des fils employés comme conducteurs. — Mesure de la résistance d'un galvanomètre. — Mesure de la résistance intérieure d'une pile. — Détermination de la valeur industrielle d'une pile . 224-233

CHAPITRE XVII

DE L'INDUCTION

Phénomènes fondamentaux. — Loi de Lenz. — Induction par les aimants. — Induction par les courants. — Cas le plus simple d'induction électromagnétique. — Self-induction.— Extra-courant.— Expérience d'Arago. Courant de Foucault. 234-248

CHAPITRE XVIII

DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

MACHINES A COURANT CONTINU

Définition. — Machine disque de Faraday. — Induit. — Inducteur. — Anneau Gramme. — Induit Siemens ou en tambour. — Fer doux des induits. — Champ magnétique, diverses formes. — Machines à pôles multiples. — Excitation du champ magnétique. — Différents modes d'excitation. — Calage des balais. — Caractéristiques des machines dynamo-électriques. — Considérations générales sur les machines dynamo-électriques. — Rendement des machines dynamo-électriques. — Réunion de plusieurs machines dynamoélectriques. 249-288

CHAPITRE XIX

MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

Machine Gramme. — Siemens. — Zipernowsky. — Westinghouse. — Ferranti. — Couplage des machines à courants alternatifs 289-296

CHAPITRE XX

UTILISATION DU COURANT ÉLECTRIQUE

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Pages.

Lampes à incandescence. — Résistance à donner au filament. — Durée des lampes. — Rendement lumineux, sa relation avec la puissance dépensée. — Intensité lumineuse dans différentes directions. — *Arc Voltaïque.* Expérience de Davy. — Propriétés de l'arc voltaïque. — Emploi des courants alternatifs. — Intensité relative des rayons émis sous diverses inclinaisons par l'arc voltaïque, dans le cas de courants continus. — Dans le cas de courants alternatifs. — Bougies Jablochkoff. — Lampes à arc à courant continu. — Lampes Foucault Duboscq. — Jaspar. — Lampes différentielles. — Principaux types de lampes à arc. — Rendement lumineux. — Effet de la résistance des charbons de la lampe 297-327

CHAPITRE XXI

ÉLECTRO-CHIMIE — GALVANOPLASTIE — ACCUMULATEURS

Anode. — Cathode. — Force électromotrice de polarisation. — Equivalent électro-chimique. — Calcul de la force électromotrice nécessaire pour qu'il y ait électrolyse. — Exemples. — Décomposition des sels métalliques. — *Galvanoplastie.* — Galvanoplastie du cuivre. — Electrotypie. — Bains simples. — Bains composés. — Cuivrage. — Laitonisage. — Nickelage. — Autres dépôts métalliques. — *Accumulateurs.* — Différence avec les condensateurs. — Formation des accumulateurs. — Accumulateur Faure. — Force électromotrice et résistance intérieure. — Variation de la force électromotrice pendant la décharge. — Régime de charge et de décharge. — Durée des accumulateurs. — Capacité. — Rendement. — Calcul d'une batterie. — Conduite . 328-354

CHAPITRE XXII

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Réversibilité des machines dynamo-électriques. — Dépla-

Pages.

cement des balais dans les moteurs à courant continu. — Rendement des moteurs électriques. — Influence de la résistance du circuit 355-363

CHAPITRE XXIII

TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

TRANSFORMATEURS

Transport de l'énergie électrique. — Règle de Sir William Thomson. — Influence de la tension. — Inconvénients des hautes tensions. — Principe des transformateurs. — Premiers transformateurs. — Transformateurs Gaulard et Gibbs, Zypernowsky, Dery, Blathy. — Transformateurs à courant continu. — Distribution de l'énergie électrique. — Distribution à conducteurs multiples, par l'intermédiaire d'accumulateurs . . . 364-382

CHAPITRE XXIV

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE

But de la télégraphie. — Parties constituantes d'un poste. — Fonctionnement des appareils. — Différents systèmes d'appareils télégraphiques. — Transmissions Duplex, diplex, quadruplex, multiples. — Téléphone de Bell. — Microphone de Hughes, d'Edison, de Blake, d'Ader. — Emploi de la bobine d'induction dans les microphones. — Composition d'un poste téléphonique. — Conditions que doit remplir une ligne téléphonique. — Induction télégraphique et téléphonique [illegible] nce de la terre sur les communications. Sytème anti inducteur de [illegible] graphie et téléphonie si[illegible] sant l'établissement [illegible] nes, — Isolateu. Essais. . . [illegible]

CHAPITRE XXV

Électricité atmosphérique. — Paratonnerre à haute tige. — Système Melsens . . . . . 411-4[illegible]

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES